



ISSN 0130-3082

Российская Академия наук

# Дефектоскопия



*Неразрушающий контроль*

*Техническая диагностика*

*Анализ материалов*

**№ 4**

**2023**



# ДЕФЕКТОСКОПИЯ

Журнал ежемесячный  
Основан в феврале 1965 года  
Екатеринбург

№ 4  
2023

## СОДЕРЖАНИЕ

### Акустические методы

- К.Е. Аббакумов, А.В. Вагин, И.Г. Сидоренко.** Акустические характеристики твердых упругих сред с ориентированной микротрещиноватостью ..... 3
- Сону Кумар Гупта, Сураджит Дас.** Прогнозирование групповых дефектов в модели прямоугольной профильной балки с использованием основанной на частотном отклике кривизны формы колебаний с помощью нейронной сети с обратным распространением ..... 14

### Электромагнитные методы

- С.П. Шляхтенков, Д.Б. Некрасов, С.В. Палагин, О.В. Бессонова, А.А. Попков, С.А. Бехер.** Возможности ручного вихретокового контроля для измерения глубины контактно-усталостных трещин поверхности катания рельсов ..... 37

### Радиационные методы

- С.А. Золотарев, А.Т. Таруат, Э.Г. Биленко.** Итерационная реконструкция изображений алюминиевого литья с учетом априорной информации ..... 46
- В.И. Сырямкин, М.Д. Хильчук, С.А. Клестов.** Неразрушающий контроль сварного соединения сплава алюминия на основе математической модели теплового процесса сварки и компьютерной микрофотографии ..... 56

### Дефектоскопические истории

- В.П. Вавилов.** ИК термографический анализ аперiodических энергетических сущностей в атмосфере (Томский феномен спустя 17 лет) ..... 66
- Информация ..... 69

## АКУСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТВЕРДЫХ УПРУГИХ СРЕД С ОРИЕНТИРОВАННОЙ МИКРОТРЕЩИНОВАТОСТЬЮ

© 2023 г. К.Е. Аббакумов<sup>1,\*</sup>, А.В. Вагин<sup>1,\*\*</sup>, И.Г. Сидоренко<sup>1,\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В.И. Ульянова (Ленина), Россия 197022 Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5  
E-mail: \*keabbakumov@etu.ru; \*\*av.vagin@bk.ru; \*\*\*irkindv@yandex.ru

Поступила в редакцию 20.12.2022; после доработки 18.03.2023

Принята к публикации 20.03.2023

Разработана в условиях распространения плоских упругих продольных волн модель их взаимодействия с упругой средой, содержащей ориентированные микротрещины, обладающие особенностью граничных условий в приближении «линейного скольжения». В приближении теории волн Блоха и Флокé определен вид дисперсионного уравнения. Получены и проанализированы результаты его решения, определяющие характер зависимостей фазовой скорости распространения и коэффициента затухания эффективной продольной волны от параметров микрошероховатости берегов трещин и других параметров модели.

*Ключевые слова:* микрошероховатые поверхности, фазовая скорость и коэффициент затухания продольных волн, коэффициенты отражения, коэффициенты прохождения, контактная жесткость в нормальном и тангенциальном направлениях.

DOI: 10.31857/S0130308223040012, EDN: XSOSKF

### ВВЕДЕНИЕ

Постоянное совершенствование традиционных конструкционных материалов и разработка новых сталкиваются с проблемой разработки и применения новых видов контрольной аппаратуры. Причина этого заключается в формировании в изделиях из таких материалов новых видов несплошностей, не описываемых известными ранее моделями. Очевидно, что появление новых видов несплошностей (дефектов) требует соответствующих изменений в структуре средств неразрушающего контроля, проектирование которых должно базироваться на использовании замещающих моделей при теоретическом анализе измерительных трактов аппаратных средств [1]. Интерес представляет и решение обратной задачи, позволяющей оценивать количественно структурные параметры материалов по результатам ультразвуковых измерений [2—5].

Наиболее широкое распространение для этих целей получили модели плоскостойких сред, очевидно, в силу сходства структур несплошностей и соответствующих моделей [6—8]. Научный раздел, связанный с изучением волновых процессов в сложноструктурированных средах, имеет обширную библиографию, отдельные фрагменты которой представлены в списке литературных источников [9—19].

Приближение слоистых сред имеет широкую практику использования по отношению к разнообразным прикладным задачам, применительно и к геоакустике [20, 21], и к условиям неразрушающего контроля [22] и т.д.

Так, например, в [22] такое приближение использовалось применительно к решению задач обнаружения и определения характеристик флокеносодержащего металла. В [22] подобные задачи решались применительно и к изделиям, изготовленным по технологиям порошковой металлургии.

Образование новых видов несплошностей возможно как для традиционных металлургических технологий, так и новых видов, как, например, аддитивные технологии изготовления композиционных материалов, например, на основе углепластиковых волокон и т.п.

Применительно к аддитивным технологиям слоистая структура получающихся материалов определяется послойным нанесением исходных компонентов с последующим лазерным воздействием [23].

Применительно к изготовлению композитов образование несплошностей связано, в частности, с «неплотным» прилеганием слоев материала при формовке и склейке (автоклавное формирование, вакуумная диффузия) [24, 25].

Если плоскостные неоднородности, изображенные на рис. 1, имеют выход на поверхность изделия, то для их изучения, кроме объемных, целесообразно привлекать и поверхностные волны, характеристики которых определяются на основании характеристик объемных волн [26—28].

В отдельных случаях, при невозможности обеспечения требуемых параметров за счет известных материалов, становится необходимым решение задачи создания специальных метаматериалов путем внедрения в известную структуру системы несплошностей, способствующих образованию новых физико-механических характеристик. Известно также, что отдельные виды технологической обработки, например термообработки металлов, способны вызывать характерные только для них виды дефектов, связанных с поверхностным растрескиванием и т.д. [7].

Учитывая изложенное, можно утверждать, что задача разработки модели микротрещиноватой среды, охватывающей влияние ранее не учитываемых параметров взаимодействующих «берегов» микротрещин, является актуальной задачей, решение которой представлено в данной работе. В плосковолновом приближении для гармонических сигналов низкочастотного диапазона для модели, учитывающей взаимодействие «берегов» микротрещин, предлагается вывод дисперсионного уравнения. Его решения определяют значения фазовой скорости и коэффициента затухания (рассеяния) эффективной продольной волны. Анализ полученного решения предполагается осуществить на основе численных оценок для набора значений параметров сплошности и шероховатости актуальных для задач ультразвуковых измерений в технических приложениях.

### ИСХОДНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

По аналогии с известными моделями «слоистых» сред [9] одной из возможных моделей такого класса является модель слоистой среды, представленная на рис. 1.

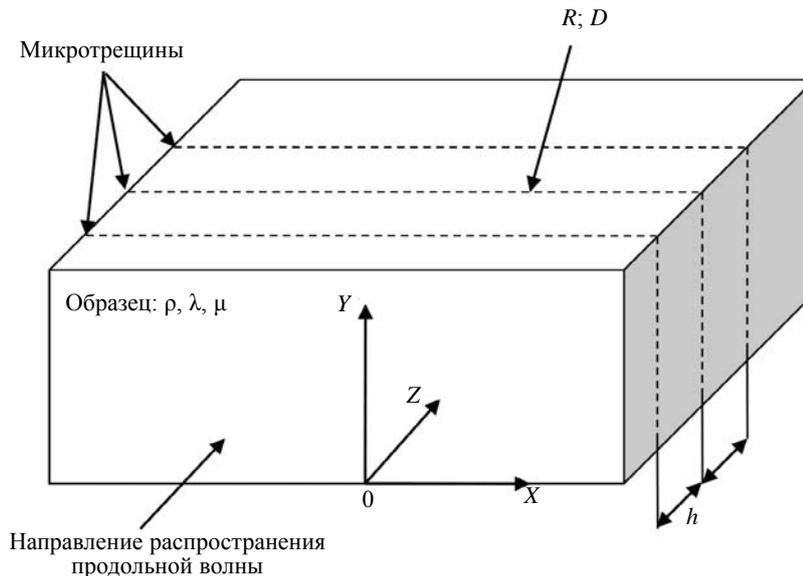


Рис. 1. Схема образования эффективной волны при прохождении ультразвука через области металла с ориентированной трещиноватостью.

Граничные условия в областях металла с ориентированной трещиноватостью в приближении «линейного скольжения» определяются следующим образом:  $\sigma_{ik}(1) = \sigma_{ik}(2)$ ,  $U_i(1) = U_i(2) - \sigma_{ik}(1,2)/KG$ , где  $U_i$  — упругое смещение;  $\sigma_{ik}$  — упругое напряжение;  $KG$  — коэффициент жесткости.

Рассмотрим процесс распространения плоской продольной волны в направлении оси  $Z$  декартовой системы координат, показанной на рис. 1. Во всем объеме среды образца с параметрами:  $\rho$  — плотность,  $\lambda$  и  $\mu$  — коэффициенты Ламэ [9, 26] расположены плоскостные протяженные неоднородности, параллельные друг другу и плоскости  $XOY$ . Каждая из этих неоднородностей обладает комплексными коэффициентами отражения:  $R = R1 + iR2$  и прохождения:  $D = D1 + iD2$ , где  $R1$ ,  $D1$  и  $R2$ ,  $D2$  — их вещественные и мнимые части соответственно. Расстояние между несплошностями равно  $h$ . Для гармонических волновых процессов с частотой  $\omega$  предполагается, что длина продольной волны существенно превосходит расстояние между несплошностями:  $\lambda \gg h$  (низкоча-

стотное приближение). Кроме того, если несплошность имеет перфорированную структуру, то следует выбирать степень перфорации, определяемую специальным коэффициентом  $\xi$ , как относительную периодическую площадь участка с отсутствием акустического контакта, низкой, с тем, чтобы на расстоянии  $h$  после прохождения несплошности могла образовываться «квазиплоская» эффективная волна.

На основании теории волн Блоха и Флоке [29, 30] при распространении упругих волн в периодических средах для волны, бегущей и имеющей вектор упругих смещений в направлении оси  $Z$ , можно считать:

$$U_z(z) = U(z) \exp(iqz), \quad (1)$$

где  $q$  — искомое волновое число эффективной волны. По определению  $U_z(z)$  (1) обладает свойством периодичности:

$$U_z(z) = U_z(z + h). \quad (2)$$

Функция (1) непрерывна и выражение (2) справедливо для любой точки на оси  $Z$ . Это позволяет ограничиться рассмотрением волнового процесса внутри слоя  $|\zeta| \leq h/2$ , где координата  $\zeta$  (на рис. 1 не показана) имеет начало в точках  $z = l \cdot h$ , где  $l = 0, 1, 2, \dots, \infty$ . Поэтому выражение (2) можно переписать:

$$U_z(h/2) = U_z(-h/2) \cdot \exp(-iqh/2). \quad (3)$$

Кроме того, выполняя граничное условие для непрерывности упругих напряжений, можно получить:

$$\frac{\partial U_z(h/2)}{\partial z} = \frac{\partial U_z(-h/2)}{\partial z} \cdot \exp(-iqh). \quad (4)$$

Представим, что выделяемый на рис. 1 слой состоит из двух областей:  $-h/2 \leq \zeta < 0$  и  $0 \leq \zeta < h/2$ . В этих двух областях могут распространяться волны в двух направлениях:  $U_z(\zeta) = A \cdot \exp(ik_l \zeta)$  и  $U_z(\zeta) = B \cdot \exp(-ik_l \zeta)$ . Каждая из этих волн отражается и ослабляется при переходе через границу  $\zeta = 0$ . Учитывая это, вводя коэффициенты отражения  $R$  и прохождения  $D$ , можно записать:

$$U_z(\zeta) = D \cdot A \exp(ik_l \zeta) + B \exp(-ik_l \zeta) + R \cdot B \exp(-ik_l \zeta) \quad \text{при } 0 < \zeta \leq h/2, \quad (5)$$

$$U_z(\xi) = A \exp(ik_l \xi) + R \cdot A \exp(-ik_l \xi) + D \cdot B \exp(-ik_l \xi) \quad \text{при } -h/2 \leq \xi \leq 0, \quad (6)$$

где  $k_l$  — волновое число продольной волны.

Подстановка выражений (5), (6) в выражения (3), (4) приводит к системе линейных однородных уравнений (7), (8) для амплитуд  $A, B$ :

$$[D - [\exp(-ik_l h) + R] \exp(-iqh)] A + [\exp(-ik_l h) + R - D \exp(-iqh)] B = 0, \quad (7)$$

$$[D - [\exp(-ik_l h) - R] \exp(iqh)] A - [\exp(-ik_l h) - R - D \cdot \exp(iqh)] B = 0. \quad (8)$$

Решение системы уравнений (7), (8) может существовать, только если ее определитель равен нулю. Это приводит к уравнению:

$$D \exp(-iqh) - (D^2 - R^2) \exp(ik_l h) - \exp(-ik_l h) + D \exp(iqh) = 0. \quad (9)$$

Собственно уравнение (9) и является дисперсионным, связывая  $qh$  с  $k_l h$ . Для целей вычислений его можно привести к более удобному виду:

$$2 \cos(qh) = D \left[ \frac{(D^2 - R^2 - 1) \exp(ik_l h)}{2} + \cos(k_l h) \right]. \quad (10)$$

Легко видеть, что для заданной частоты, т.е. для заданной величины  $k_1h$  из уравнения (10), вычисляется эффективное волновое число  $q$ . Правая часть дисперсионного уравнения (10) в общем случае является комплексной величиной. Тогда для выполнения равенства необходимо также представить  $q$  в виде комплексной величины:  $q = q_1 + iq_2$ . Подстановка этого выражения в (10) и выделение реальной и мнимой частей приводит к выражениям:

$$\begin{aligned} \cos(q_1h) \cdot \operatorname{ch}(q_2h) &= P, \\ \sin(q_1h) \cdot \operatorname{sh}(q_2h) &= Q, \end{aligned} \quad (11)$$

где 
$$P = \frac{\{D1[F1 \cos(k_1h) - F3 \sin(k_1h)] + D2[F2 \sin(k_1h) + F3 \cos(k_1h)]\}}{2 \cdot D^2},$$

$$Q = \frac{\{D2[F1 \cos(k_1h) - F3 \sin(k_1h)] + D1[F2 \sin(k_1h) + F3 \cos(k_1h)]\}}{2 \cdot D^2},$$

$$F1 = D1^2 - D2^2 - R1^2 + R2^2 + 1,$$

$$F2 = D1^2 - D2^2 - R1^2 + R2^2 - 1, F3 = 2 \cdot (D1 \cdot D2 - R1 \cdot R2).$$

Решая систему уравнений (11), можно получить следующие выражения: для вещественной части волнового числа:

$$q_1 = \frac{\arcsin \left\{ \frac{1 - P^2 - Q^2}{2} + \left[ \left( \frac{1 - P^2 - Q^2}{2} \right)^2 + Q^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}^{\frac{1}{2}}}{h}, \quad (12)$$

для мнимой части волнового числа:

$$q_2 = \frac{\operatorname{arsh} \left[ \frac{Q}{\sin(k_1h)} \right]}{h}. \quad (13)$$

Используя выражение для вещественной части волнового числа эффективной продольной волны (12), легко получить значение фазовой скорости эффективной продольной волны:  $c_{\text{эфф}} = \omega/q_1$ . Вычисления по (13) сразу дают значения коэффициента затухания (рассеяния) в Нп/м.

Вычисления по формулам (12), (13) для учитываемых моделей несплошностей можно осуществлять после подстановки функциональных зависимостей комплексных в общем случае выражений коэффициентов отражения и прохождения для конкретных типов несплошностей. Это повышает значимость решения задач определения соответствующих коэффициентов отражения и прохождения для плоскостных неоднородностей, подтверждая перспективность концепции моделирования плоскостных протяженных неоднородностей применительно к задачам в области ультразвукового контроля.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Выберем в качестве модели несплошности трещиноподобный объект, шероховатые поверхности которого имитируются микровыступами сферической формы, их взаимодействие сопровождается эффектом «проскальзывания» [31]. При этом, исходя из рис. 1, упругие напряжения  $\sigma_{ik}$  передаются без изменений, а упругие смещения  $U_i$  могут испытывать «разрыв». В качестве количественной меры, определяющей степень проскальзывания (разрыва), выступают модули контактных жесткостей, действующих в нормальном и тангенциальном по отношению к плоскости трещины направлениях, в общем случае представляемые в виде тензора второго ранга [31]:

$$\mathbf{KG} = \begin{bmatrix} KGN & 0 & 0 \\ 0 & KGT_1 & 0 \\ 0 & 0 & KGT_2 \end{bmatrix}. \quad (14)$$

В случае плоской задачи в (14) неизвестными можно считать только две величины: нормальную и тангенциальную жесткости, для которых в [31, 32] получены выражения  $KGN$ ,  $KGT$ . Там показано, в частности, что в случае малости высоты микровыступов по сравнению с длиной падающей упругой волны для разнородных материалов модуль нормальной контактной жесткости определяется зависимостью:

$$KGN = \frac{(\lambda_1 + 2\mu_1)(\lambda_2 + 2\mu_2)c_{11}c_{12}}{(\lambda_1 + 2\mu_1)c_{11} + (\lambda_2 + 2\mu_2)c_{12}} \frac{2\pi\xi}{\omega d^2(1-\xi)}, \quad (15)$$

по аналогии модуль тангенциальной контактной жесткости имеет вид:

$$KGT = \frac{\mu_1\mu_2c_{11}c_{12}}{\mu_1c_{11} + \mu_2c_{12}} \frac{2\pi\xi}{\omega d^2(1-\xi)}, \quad (16)$$

где  $\rho_1, \lambda_1, \mu_1$  и  $\rho_2, \lambda_2, \mu_2$  — плотность и коэффициенты Ламэ для сред, лежащих выше и ниже границы раздела соответственно;  $\omega = 2\pi f$  — круговая частота, а  $f$  — линейная частоты;  $d$  — среднее расстояние между соседними микровыступами на контактирующих поверхностях;  $\xi$  — коэффициент перфорации:  $\xi = 1 - b^2/d^2$ , где  $b$  — средний размер участка с отсутствием контакта [33]. Величины  $d$  и  $\xi$  являются параметрами модели.

В предположении малости высоты микровыступов сферической формы по сравнению с длиной волны, также в соответствие с другими рекомендациями в [31, 32], показано, что величина среднего расстояния между микровыступами может быть представлена в виде (17):

$$d = 2\sqrt{2aRz - (Rz)^2}, \quad (17)$$

где  $a$  — радиус замещающего сферического микровыступа;  $Rz$  — величина шероховатости [31, 32]. Кроме того, было показано, что средний радиус площади контактного пятна  $r \approx (2/3)\sqrt{2aRz}$ , откуда  $d^2 - b^2 \approx 2\pi r^2$ .

Общий вид зависимостей нормальной и тангенциальной контактных жесткостей для микротрещины в стали от коэффициента перфорации  $\xi$  и от параметра шероховатости  $Rz$  при заданных значениях радиусов микросфер и частоты представлен на рис. 2, 3.

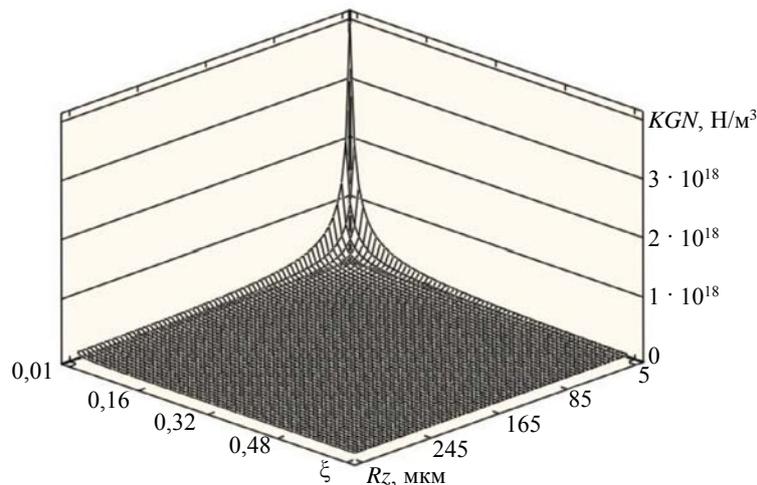


Рис. 2. Зависимость  $KGN$ -нормальной контактной жесткости от коэффициента перфорации  $\xi$  ( $0,01 < \xi < 0,64$ ) и значений параметра шероховатости:  $5 \cdot 10^{-6} \text{ м} < Rz < 320 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ ;  $f = 1,25 \text{ МГц}$ ,  $a = 0,5 \text{ мм}$ , материал — сталь.

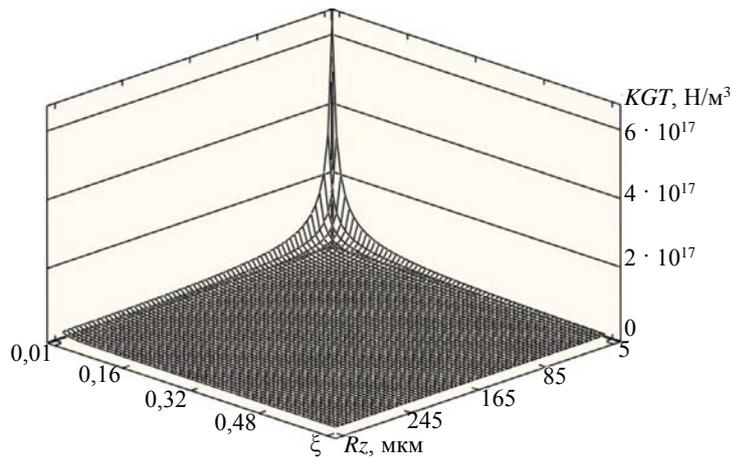


Рис. 3. Зависимость  $KGT$ -тангенциальной контактной жесткости от коэффициента перфорации  $\xi$  ( $0,01 < \xi < 0,64$ ) и значений параметра шероховатости:  $5 \cdot 10^{-6} \text{ м} < R_z < 320 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ ;  $f = 1,25 \text{ МГц}$ ,  $a = 0,5 \text{ мм}$ , материал — сталь.

Как следует из рис. 3, 4, указанные зависимости представляют собой гладкие функции, обеспечивая при вычислениях плавный переход от условий «сварного» контакта до условий «свободной» границы. При этом величина нормальной контактной жесткости превосходит величину тангенциальной при всех сочетаниях, учитываемых в модели параметров.

Выражения для коэффициентов отражения и прохождения продольной волны при ее нормальном падении для однородных материалов с выделением в них вещественных и мнимых частей примут вид [31]:

$$R = \frac{\frac{i\omega\rho_1 c_{l1}}{KGN}}{2 - \frac{i\omega\rho_1 c_{l1}}{KGN}} = R1 + iR2, \quad (18)$$

$$D = \frac{2}{2 - \frac{i\omega\rho_1 c_{l1}}{KGN}} = D1 + iD2. \quad (19)$$

Подстановка выражений (18) и (19) в уравнения (12) и (13) с учетом (17) приводит к окончательным выражениям, на основании которых осуществлялись численные оценки фазовой скорости и коэффициента затухания эффективной продольной волны. Из-за громоздкости эти выражения в окончательном виде не приводятся.

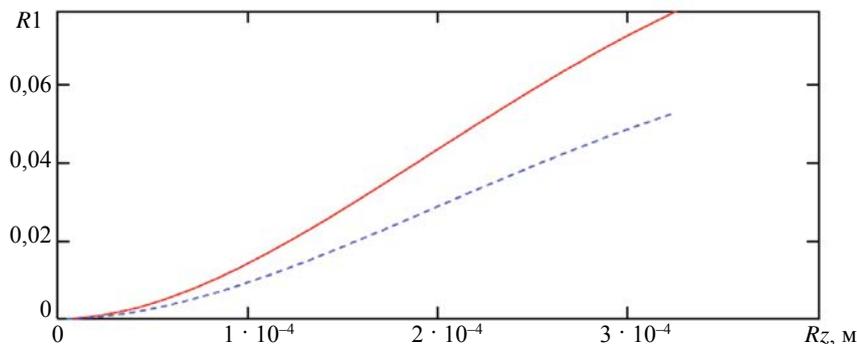


Рис. 4. Зависимость вещественной части коэффициента отражения ультразвука от параметра шероховатости при заданных значениях коэффициента перфорации: (—) —  $\xi = 0,65$ ; (---) —  $\xi = 0,6$ ; частота ультразвука  $f = 1,25 \text{ МГц}$ ,  $a = 0,5 \text{ мм}$ , материал — сталь.

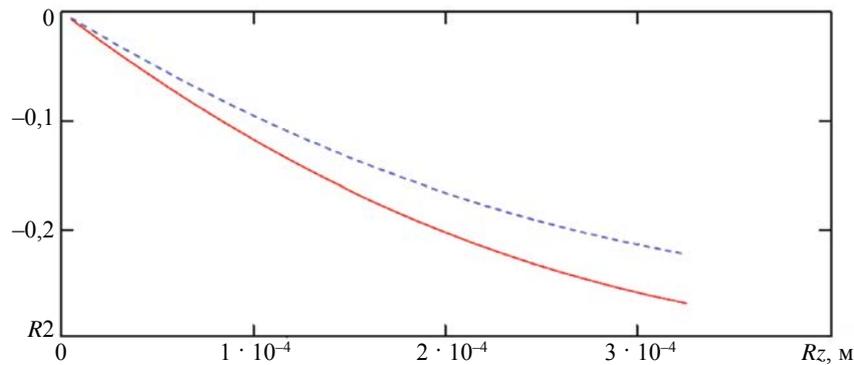


Рис. 5. Зависимости мнимой части коэффициента отражения ультразвука от параметра шероховатости при заданных значениях коэффициента перфорации: (—) —  $\xi = 0,65$ ; (----) —  $\xi = 0,6$ ; частота ультразвука  $f = 1, 25$  МГц,  $a = 0, 5$  мм, материал — сталь.

Предварительно для наглядности вычислялись зависимости вещественных и мнимых частей для актуальных сочетаний значений коэффициента перфорации и параметра шероховатости и других параметров модели. На рис. 4, 5 представлены зависимости вещественной и мнимой частей коэффициента отражения ультразвука от параметра шероховатости при заданных значениях коэффициента перфорации, а рис. 6 — модуля коэффициента отражения при заданной частоте и радиусе сферического микроконтакта.

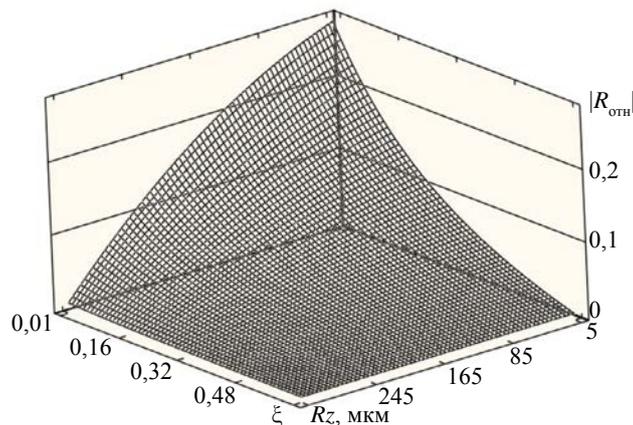


Рис. 6. Зависимость модуля коэффициента отражения ультразвука  $|R_{отн}|$  от параметра шероховатости и коэффициента перфорации; частота ультразвука  $f = 1,25$  МГц,  $a = 0,5$  мм, материал — сталь.

На рис. 7, 8 представлены зависимости вещественной и мнимой частей коэффициента прохождения от параметра шероховатости при заданных значениях коэффициента перфорации, а на рис. 9 — модуля коэффициента прохождения при заданной частоте и радиусе сферического микровыступа.

Отметим, что представленные на рис. 6 и 9 значения коэффициентов отражения и прохождения могут носить приближенный характер, особенно для предельно малых значений коэффициента перфорации и параметра шероховатости, из-за накапливающейся погрешности вычислений. Кроме того, указанные коэффициенты (18) и (19) и для однородных, и для разнородных сред [31] являются амплитудными коэффициентами по колебательной скорости (смещению), а для проверки энергетических соотношений они должны заменяться соответствующими коэффициентами по энергии [12]. Отметим также, что при стремлении значений контактных жесткостей  $KGN \rightarrow \infty$  и  $KGT \rightarrow \infty$  указанные выражения переходят в известные формулы для «сварного» контакта [12], для которых нарушения закона сохранения энергии не отмечается.

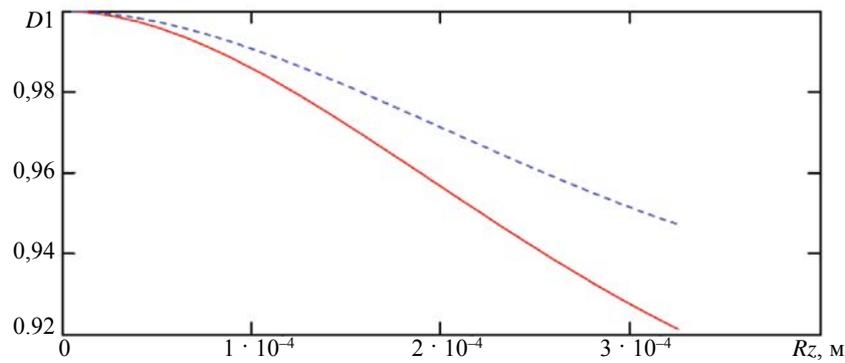


Рис. 7. Зависимости вещественной части коэффициента прохождения ультразвука от параметра шероховатости при заданных значениях коэффициента перфорации: (—) —  $\xi = 0,65$ ; (----) —  $\xi = 0,6$ ; частота ультразвука  $f = 1,25$  МГц,  $a = 0,5$  мм, материал — сталь.

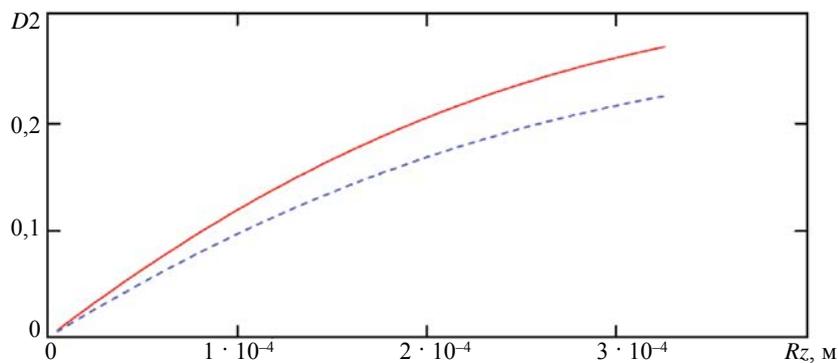


Рис. 8. Зависимость мнимой части коэффициента прохождения ультразвука от параметра шероховатости при заданных значениях коэффициента перфорации: (—) —  $\xi = 0,65$ ; (----) —  $\xi = 0,6$ ; частота ультразвука  $f = 1,25$  МГц,  $a = 0,5$  мм, материал — сталь.

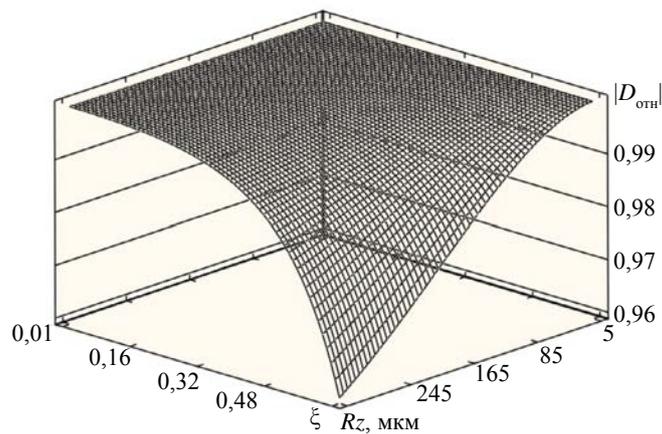


Рис. 9. Зависимость модуля коэффициента прохождения ультразвука  $|D_{отн}|$  от параметра шероховатости и коэффициента перфорации; частота ультразвука  $f = 1,25$  МГц,  $a = 0,5$  мм, материал — сталь.

Результаты вычислений значений эффективной скорости продольной волны  $C_{l,эфф}$  представлены на рис. 10.

Как следует из данных графика поверхности на рис. 10, скорость эффективной плоской продольной волны с ростом концентрации микротрещин и частоты монотонно убывает от максимального значения, характерного для невозмущенной среды (стали), до существенно меньших значений.

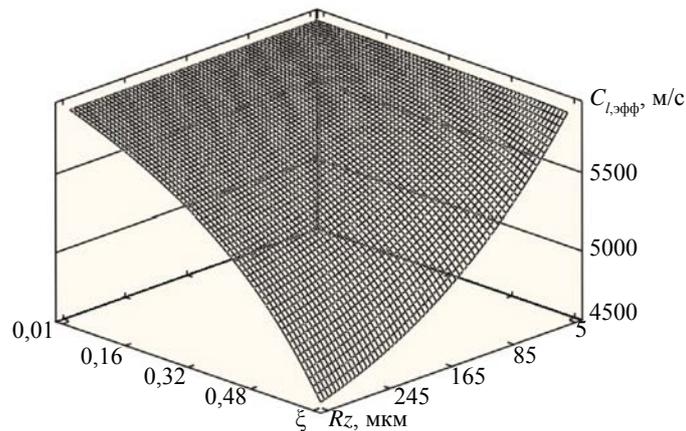


Рис. 10. Зависимость значений эффективной скорости продольной волны  $C_{l,эфф}$  ультразвука от параметра шероховатости и коэффициента перфорации; частота ультразвука  $f = 1,25$  МГц,  $a = 0,5$  мм, материал — сталь.

На рис. 11 представлены зависимости коэффициента затухания эффективной плоской продольной волны от параметров плоскостной протяженной несплошности: коэффициента перфорации  $\xi$  и параметра шероховатости  $R_z$  при заданных значениях частоты ультразвука и радиуса микросфер, моделирующих выступы шероховатостей в стали.

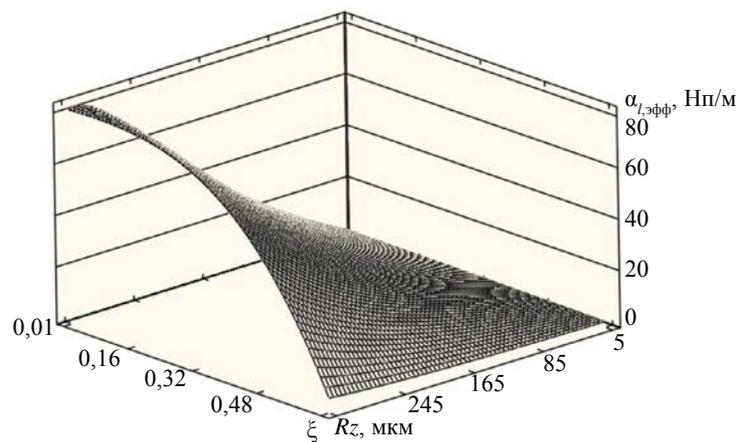


Рис. 11. Зависимость коэффициента затухания эффективной плоской продольной волны  $\alpha_{l,эфф}$  от параметра шероховатости и коэффициента перфорации; частота ультразвука  $f = 1,25$  МГц,  $a = 0,5$  мм, материал — сталь.

Как показал результат анализа графика поверхности на рис. 11, зависимость коэффициента затухания эффективной продольной волны имеет сходный характер по сравнению с фазовой скоростью, сопровождается возрастанием с ростом частоты. Видно также, что динамический диапазон изменения коэффициента затухания в исследованном диапазоне изменения параметра шероховатости и коэффициента перфорации может составлять примерно 20 и более дБ и увеличивается с ростом частоты. Наличие изменений фазовых скоростей и дополнительного затухания должно учитываться при исследованиях распространения и поверхностных, и близких к ним типов волн, образующихся в приповерхностных областях в материалах с упорядоченной структурой. Обратим внимание, что в исходной среде (без трещин) малым поглощением из-за влияния процессов вязкости и теплопроводности пренебрегалось, и для вычислений параметры Ламэ выбирались как вещественные величины.

Отметим, что в исследованных случаях при стремлении параметров микротрещин (параметра шероховатости и коэффициента перфорации) к нулю значение фазовой скорости эффективной продольной волны стремится к значению скорости объемной продольной волны в исходной изотропной бездефектной среде, а дополнительный коэффициент затухания (рассеяния) — к нулю.

При изучении распространения поперечных волн в микротрещиноватой среде достаточно в формулы (18), (19) подставить значения импеданса для поперечных волн, а жесткость  $KGN$  заменить на  $KGT$ . Если полученные выражения подставить в (12) и (13), то проведенные после этого вычисления дают сходные результаты с вычислениями для продольных волн, поэтому из объемной записи не приводятся.

Влияние на свойства материалов, содержащих несплошности, выходящие на поверхность, можно оценивать с помощью поверхностных волн [27]. При этом значения эффективных скоростей поверхностных волн необходимо оценивать при решении дисперсионных уравнений, содержащих значения эффективных скоростей объемных упругих волн [27].

Одной из последних работ, в которой проведено сравнение теории с экспериментом, является [34]. В ней удалось обосновать значения акустических характеристик графитовых включений в медных сплавах, полученных по технологии двойного вакуумного переплава [34] путем обоснования гипотезы о выполнении граничных условий в приближении «линейного скольжения» на поверхностях графитовой прослойки в меди и возможной структуре графита, близкой по свойствам к гранулированной (консолидированной) среде [22]. К сожалению, прямые эксперименты, связанные с построением натурной модели выполнения условий «линейного скольжения» в настоящее время пока не обеспечивают необходимой стабильности и повторяемости результатов. Косвенным подтверждением корректности разработанной модели является сводимость ее результатов к частным случаям, известным по более ранним работам [9].

## ВЫВОДЫ

Предложена модель, учитывающая влияние шероховатости контактирующих поверхностей микротрещин на параметры информационных сигналов, образуемых при преломлении упругих волн на множестве ориентированных плоских границ раздела твердых слоев, имитирующих также отдельные виды объемных несплошностей с ориентированной микротрещиноватостью.

Полученные выражения для дисперсионных уравнений (10)—(13) образуют полные системы уравнений, необходимых для определения фазовой скорости и коэффициента затухания (рассеяния) эффективных плоских продольных волн применительно к неоднородностям с усложненной структурой, которые могут быть распространены на свойства других объемных и поверхностных волн.

Указанные уравнения и результаты их решений имеют как самостоятельный интерес, так и обладают потенциальной полезностью прикладного характера при интерпретации результатов ультразвуковых измерений с применением неучитываемых ранее параметров прилегающих поверхностей микротрещин для оценки физико-механических характеристик как традиционных, так и новых материалов, обладающих слоистыми особенностями внутренней структуры.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ермолов И.Н. Теория и практика ультразвукового контроля. М.: Машиностроение, 1981. 240 с. с илл.
2. Ермолов И.Н., Алешин Н.П., Потапов А.И. Неразрушающий контроль. В 5 кн. Кн. 2. Акустические методы контроля: Практ. пособие / Под ред. В.В. Сухорукова. М.: Высш. шк., 1991. 283 с.
3. Алешин Н.П., Бобров В.Т., Ланге Ю.В., Щербинский В.Г. Ультразвуковой контроль. Учеб. пособие / Под общ. ред. В.В. Клюева. М.: Изд. Дом Спектр, 2011. 224 с.
4. Муравьев В.В., Зуев Л.Б., Комаров К.Л. Скорость звука и структура сталей и сплавов. Новосибирск: Наука, Сибирская издательская фирма РАН, 1996. 184 с.
5. Муравьев В.В., Муравьева О.В., Байтеряков А.В. Структурно-чувствительные акустические параметры конструкционных сталей. Ижевск: Изд-во ИжГТУ имени М.Т. Калашникова, 2022. 152 с.
6. Гегузин Я.Е. Макроскопические дефекты в металлах. М.: Металлургиздат, 1962. С. 252.
7. Атлас дефектов стали / Под ред. М.Л. Бернштейна. М.: Металлургия, 1979. 178 с.
8. Фрактография и атлас фрактограмм. Справочник / Под ред. М.Л. Бернштейна. М.: Металлургия, 1982. 489 с.
9. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. М.: Изд-во Академии Наук СССР, 1956.

10. Бриллюэн Л., Пароди М. Распространение волн в периодических структурах. М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1959. 447 с.
11. Кунин И.А. Теория упругих сред с микроструктурой. Нелокальная теория упругости. М.: Изд-во Наука, 1975. 416 с.
12. Лепендин Л.Ф. Акустика / Учеб. пособие для вузов. М.: Высшая школа, 1978.
13. Вавакин А.С., Салганик Р.Л. Эффективные упругие характеристики тел с изолированными трещинами, полостями и жесткими неоднородностями // Механика твердого тела. 1978. № 2. С. 95—107.
14. Петрашень Г.И. Распространение волн в анизотропных упругих средах. Л.: Наука, 1980. 280 с.
15. Гузь А.Н. Упругие волны в телах с начальными напряжениями. Киев: Наукова думка, 1986. 536 с.
16. Jose M. Carcione anisotropic Q and velocity dispersion of finely layered media // Geophysical Prospecting. 1992. V. 40. P. 761—783.
17. Luk'yashko O.A., Saraikin V.A. Transient one-dimensional wave processes in a layered medium // Journal of Mining Science. 2007. V. 43. P. 145—158.
18. Brun M., Guenneau S., Movchan A.B., Bigoni D. Dynamics of structural interfaces: Filtering and focussing effects for elastic waves // J. Mech. Physics Solids. 2010. V. 58. P. 1212—1224.
19. Panasyuk O.N. Propagation of Quasishear Waves in Prestressed Materials with Unbonded Layers // Int. Appl. Mech. 2011. V. 47. P. 276—282.
20. Ямицков В.С., Бауков Ю.И. Геоакустика. Раздел: Упругие волны в неоднородном массиве. Изд-во МГИ, 1973. С. 256.
21. Горбачевич Ф.Ф. Отражение и преломление упругих волн на границе раздела сред. Апатиты: Кольский филиал РАН. 1985.
22. Аббакумов К.Е., Цаплев В.М. Волновые задачи акустических методов неразрушающего контроля. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. 336 с.
23. Алешин Н.П., Мурашов В.В., Щупаков Н.А., Краснов И.С., Ложкова Д.С. Экспериментальное исследование возможностей и особенностей ультразвукового контроля деталей, изготовленных по аддитивным технологиям // Дефектоскопия. 2016. № 12. С. 17—24.
24. Потапов А.И., Махов В.Е. Физические основы контроля упругих характеристик анизотропных композиционных материалов ультразвуковым методом // Дефектоскопия. 2017. № 11. С. 33—49.
25. Панасюк О.Н. Анализ влияния граничных условий на распространение волн в слоистых композитных материалах // Прикладная механика. 2014. № 4. С. 52—58.
26. Ультразвук. Маленькая энциклопедия / Глав. Ред. И.П. Голямина. М.: Советская энциклопедия, 1979.
27. Викторов И. А. Звуковые поверхностные волны в твердых телах. М.: Наука, 1981. 287 с.
28. Хлыбов А.А. Исследование влияния микрон неоднородности среды на распространение поверхностных волн // Дефектоскопия. 2018. № 6. С. 3—10.
29. Reusseau M. Floquet wave properties in a periodically layered medium // J. Acoust. Soc. Amer. 1989. V. 86. No. 6. P. 2369—2378.
30. Achenbach J., Kitachara M. Reflection and transmission of an obliquely incident wave by an array of spherical cavities // J. Acoust. Soc. Amer. 1986. V. 80. No. 4. P. 1209—1214.
31. Аббакумов К.Е. Рассеяние плоских упругих волн на микрошероховатой границе раздела твердых сред // Дефектоскопия. 2017. № 7. С. 3—13.
32. Abbakumov K.E., Vagin A.V. Dispersion Equation for Longitudinal Waves in a Layered Medium with Inhomogeneous Boundary Conditions in Different Propagation Directions // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2020. V. 56. No. 1. P. 20—27.
33. Справочник по триботехнике. В 3 т. Т.1. Теоретические основы / Под общей ред. М. Хебды. М.: Машиностроение, 1989. С. 56—58.
34. Аббакумов К.Е., Вагин А.В., Сидоренко И.Г. Акустические характеристики графитовых включений в листах из медного сплава, полученного по технологии двойного вакуумного переплава / Сб. статей 8-й Международной научно-технической конференции «Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов». С. 11—16. Могилев, 29—30 сентября 2022 г. Изд-во Белорус. Рос. ун-та, 2022. 306 с.

# ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ГРУППОВЫХ ДЕФЕКТОВ В МОДЕЛИ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ПРОФИЛЬНОЙ БАЛКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОСНОВАННОЙ НА ЧАСТОТНОМ ОТКЛИКЕ КРИВИЗНЫ ФОРМЫ КОЛЕБАНИЙ С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОННОЙ СЕТИ С ОБРАТНЫМ РАСПРОСТРАНЕНИЕМ

© 2023 г. Сону Кумар Гупта<sup>1,\*</sup>, Сураджит Дас<sup>1,\*\*</sup>

<sup>1</sup>Национальный технологический институт, Агартала, Индия  
E-mail: \*sngupta77@gmail.com; \*\*surajit2006r@gmail.com

Поступила в редакцию 07.12.2022; после доработки 14.02.2023  
Принята к публикации 14.02.2023

В гражданской инфраструктуре конструкции, состоящие из профильных элементов, играют важную роль с экономической точки зрения благодаря меньшему собственному весу и устойчивости к функциональным нагрузкам. В настоящее время периодическое обслуживание или мониторинг состояния конструкций является обязательным для достижения максимального использования потенциала конструктивных элементов. В данной работе проведены экспериментальное, численное и аналитическое исследования для изучения структурного повреждения и его серьезности в трубчатой прямоугольной балке из конструкционной стали. Модальные параметры извлекаются с помощью регистратора динамических параметров (В&К) путем воздействия ударного молотка на модельную конструкции и получения данных с помощью набора однонаправленных акселерометров. Сначала из полученных модальных параметров извлекаются две формы колебаний. Ожидается, что во время эксперимента модальные параметры будут содержать шум окружающей среды, поэтому для получения данных без шума необходимо его устранить. Для уменьшения шума в модальных параметрах, полученных на эксперименте, используется обучение искусственной нейронной сети. Используя модифицированные модальные параметры, определяют кривизну формы моды, а так называемая измененная кривизна формы колебаний (ИКФК) используется для расчета индекса дефекта кривизны. Индекс дефекта кривизны применим для исследования расположения групповых дефектов с различными уровнями критичности в конструкциях, состоящих из профильных прямоугольных балок.

*Ключевые слова:* модель профильной балки, зашумление модальных составляющих, искусственная нейронная сеть, измененная кривизна формы колебаний, индекса дефекта кривизны расположение групповых дефектов.

DOI: 10.31857/S0130308223040024, EDN: ХУНАJW

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В действительности, конструкции в гражданской или промышленной инфраструктуре постепенно деградируют на протяжении всего срока службы под воздействием факторов окружающей среды и других воздействий. Безопасность и надежность конструкции гарантируется благодаря мониторингу состояния конструкции даже после многократных внешних воздействий высокой интенсивности. Мониторинг состояния конструкций и контроль повреждений в гражданской инфраструктуре требует эффективного, надежного и экономичного инструмента для контроля состояния конструкции в период эксплуатации. Повреждения или разрушения могут произойти в результате серьезных аварий, взрывных работ вблизи сооружения, боевых действий, стихийных бедствий, включая землетрясения, сильные наводнения, ураганы и оползни. Значимость мониторинга состояния конструкций (МСК) и контроль дефектов играют важную роль при прогнозировании повреждений в существующих конструкциях. Ранее было проведено множество исследований, в которых использовались модальные параметры на основе вибрационных колебаний. Некоторые из важных исследований представлены в разделе «Введение» следующим образом. Для простых и сплошных балок с различными местами расположения дефектов были получены модельные расчеты, после чего были разработаны методики для применения на реальных мостовых конструкциях [1]. Модельный анализ проводили для простых балок и балок с закрепленными концами для исследования трещин в различных месторасположениях. Для исследования физических изменений в модельных конструкциях получены данные о частотных характеристиках ускорения и собственных частотах [2]. Исследование показало, что дефекты могут быть идентифицированы с использованием собственных частот в дефектных балках. Дополнительные антирезонансные пики на амплитудно-частотной характеристике используются в качестве средства локализации трещин [3]. Групповые трещины исследовали в профильной консольной балке с помощью аналитических и численных методов. Для проверки достоверности модели проводится эксперимент с целью определения вибрационных параметров модели [4]. Обнаружение

утечек в трубопроводе изучали с помощью изменения взаимной спектральной плотности при измерении вибрации в определенных местах. Сложный трубопровод испытывали в лаборатории для определения одиночных и множественных утечек в системе [5]. В исследовании по контролю дефектов консольную балку круглого трубчатого сечения и коробчатого сечения проверяли с помощью теоретической и экспериментальной модели с использованием собственных частот и соответствующих форм колебаний [6]. Для определения места повреждения предложен вибрационный метод, использующий производную формы колебаний [7]. В работе представлен метод обнаружения повреждений моста, основанный на результирующем смещении, вызванным транспортным средством, при этом метод не требует предварительной информации об интенсивности движения и шероховатости поверхности [8]. Авторы продемонстрировали метод обнаружения повреждений с использованием вторых производных формы колебаний для контроля дефектов конструкции [9, 18, 22]. Обнаружение повреждений на основе АЧХ приведено для балочных и ферменных конструкций. Численно полученные данные оптимизируются методом роя частиц для определения конкретных мест повреждений в конструкциях [11]. Представлен обзор на основе МСК, включающий идентификацию нелинейной системы с использованием нелинейных динамических подходов [12]. Сварное соединение исследуется с помощью модального анализа. Механические свойства анализировали для количественной оценки качества сварки в конструкции [13]. Разница между прогнозируемой кривизной формы колебаний и фактическим значением кривизны формы колебаний использовали для определения места повреждения в конструкции балочного типа [14]. Единичные и множественные повреждения идентифицируются с помощью вибрационных характеристик, таких как собственные частоты и формы колебаний для модели балки [15]. В предложенном исследовании повреждение балки характеризуется с помощью результатов испытания по определению частот и форм собственных колебаний конструкции. Место повреждения определяли с помощью собственных частот и формы первой моды неповрежденных и поврежденных конструкций [16]. Предложена стратегия обнаружения повреждений на основе вибрации с применением кривизны формы колебаний. Модальные данные извлекаются в условиях шума, а уровень шума устраняется искусственной нейронной сетью, чтобы определить правильное местоположение повреждения [17]. В [23] представлено исследование, основанное на методе поверхности отклика (МПО), в котором используются собственные частоты и формы мод. Эффективность метода продемонстрирована на примере численного исследования простой балки и стальной рамы, подвергнутой лабораторным испытаниям. Показано, что метод RSM может эффективно выявлять дефекты в конструкциях. Повреждение в шестнадцатиэтажном каркасном здании определяется с помощью метода поверхности отклика, который также использует три трансляционные частоты формы колебаний и первые две формы колебаний [19]. Многослойная конструкция анализируется с использованием рассчитанных и экспериментально определенных модальных параметров, таких как собственные частоты [20]. Проводили сравнительное исследование временного отклика между бездефектными и дефектными конструкциями. Это конкретное исследование осуществляли на основе двух подходов, а именно селективного индексного метода и скачкообразного изменения сдвигающих сил [21]. Модальные параметры на основе вибрации используются для выявления одиночных и множественных повреждений в консольной балке [24, 25]. В отдельных исследованиях собственные частоты применяют для выявления дефектов и снижения жесткости конструкций [26, 27]. Для идентификации повреждений в предварительно напряженных шпалах используются квадраты кривизны формы колебаний [28]. Наличие небольших структурных повреждений определяется с помощью многоступенчатой модели искусственной нейронной сети [30]. Повреждения ферменной конструкции исследуют с помощью данных АЧХ в качестве входных данных для модели ИНС [31]. Исследуется возможность обнаружения повреждений в двутавровой балочной конструкции в двойной точке с использованием динамического поведения на основе ИНС [32]. Модель ИНС разработана для уменьшения шума от регистрируемых сигналов с целью улучшения работы модели [36].

Для оценки эксплуатационных характеристик конструктивных сооружений проведение МСК и контроль дефектов является необходимым на всем процессе эксплуатации. На протяжении более 40 лет применяли ряд подходов для оценки состояния конструкций и прогнозирования их поведения в режиме реального времени. Для контроля дефектов конструкций в большинстве предыдущих исследований задействовали смоделированные данные АЧХ. Основной целью данного исследования является использование ИНС для минимизации погрешности измерений в наборах данных АЧХ, которые были получены экспериментально, после чего обучающие наборы данных АЧХ будут привлекать для расчета кривизны формы колебаний, соответствующей бездефектным и дефектным конструкциям. Чтобы точно определить

расположение и критичность дефекта, наконец, определяется индекс дефекта кривизны как для бездефектных, так и для дефектных конструкций.

**Условные обозначения.** В статье использованы следующие условные обозначения: В&К — Buel & Kjaer; БПФ — быстрое преобразование Фурье; ИКФК — измененная кривизна формы колебаний; МКЭ — метод конечных элементов;  $H_\omega$  — отклик модели;  $\omega$  — собственная частота; ИНС — искусственная нейронная сеть; АИДК — абсолютный индекс дефекта кривизны; АЧХ — амплитудно-частотная характеристика;  $\gamma^2$  — функция когерентности;  $M$  — масса модели; САО — среднее абсолютное отклонение;  $C$  — демпфирование модели; МСК — мониторинг состояния конструкций;  $K$  — жесткость модели.

### Задачи исследования

Задачи данного исследования изложены на основе имеющейся литературы:

построение форм поперечных колебаний с использованием модального отклика АЧХ (мнимая часть);

для разграничения состояния конструкции необходимо сравнить данные собственных частот при различных уровнях повреждений;

чтобы уменьшить наличие шума в модели АЧХ, модальные параметры обучаются с помощью искусственной нейронной сети с соответствующей топологией;

построение формы колебаний с использованием обученных модальных АЧХ;

построение кривизны формы колебаний с помощью метода аппроксимации центральной разности с использованием данных модальных АЧХ для необученных и обученных состояний сети;

индекс дефекта кривизны, который показывает точное местоположение дефекта в модели, рассчитывается с использованием кривизны формы колебания.

## 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

### 2.1. Изгибные колебания балки

Исследовали балочную конструкцию, которая совпадает с осью  $x$  в системе координат. Площадь поперечного сечения ( $A_x$ ) и момент инерции ( $I_x$ ) представляют геометрические параметры модели конструкции. Модель балки представлена на рис. 1.

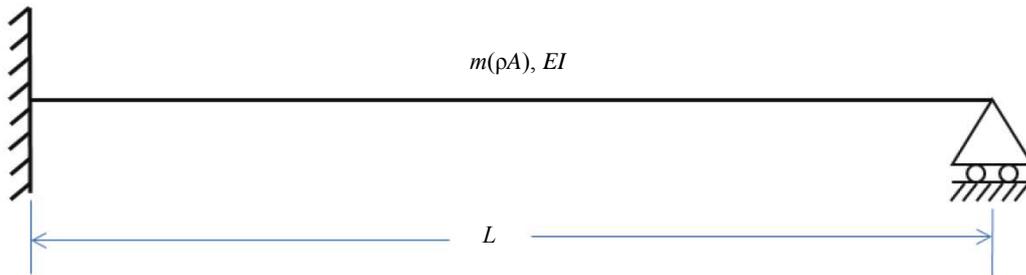


Рис. 1. Модель консольной балки с опорой.

В общем случае свойства материала включают модуль упругости ( $E_x$ ) и плотность ( $\rho_x$ ) как функцию от расстояния ( $x$ ) вдоль балки. При отсутствии поперечной нагрузки ( $q$ ) свободные колебания модели могут быть представлены в виде дифференциального уравнения. Моды в поперечном направлении задаются как  $\varphi$  [16]:

$$\frac{d^2}{dx^2} \left( E_{(x)} I_{(x)} \frac{\partial^2 \varphi_x}{\partial x^2} \right) - \rho_{(x)} A_{(x)} \omega_n^2 \varphi_x = 0. \quad (1)$$

Термин  $\omega$  — собственная частота для модели конструкции.

В общем случае форма колебания и график кривизны формы колебания представлены для модели консольной балки с опорой. Собственная частота  $\omega$ , связанная с формами поперечных колебаний, представлена в этом уравнении. Когда конструкция балки однородна, с однородными геометрическими параметрами и свойствами материала, решение дифференциального уравнения (1) может быть выражено в виде:

$$\varphi_{(n)} = \cosh(\beta_n x) - \cos(\beta_n x) - \alpha_n \{ \sinh(\beta_n x) - \sin(\beta_n x) \}. \quad (2)$$

В модели консольной балки с опорой  $\beta_n$  и  $\alpha_n$  равны [39]. Тривиальное решение уравнения (2) представляется в виде уравнения:

$$\beta_n L = (4n + 1) \frac{\pi}{4}. \quad (3)$$

Собственные частоты рассчитываются по данной формуле:

$$\omega_n = \beta_n^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho AL^4}}; \quad (4)$$

$$\omega_n = \frac{\pi^2 (4n + 1)^2}{16} \sqrt{\frac{EI}{\rho AL^4}}. \quad (5)$$

В уравнении (2) представлены следующие условия:  $L$  — длина балки,  $\beta_n$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) — постоянная величина, а в уравнении (6)  $\beta_n$  — безразмерная величина:

$$\beta_n = \left( \frac{\rho A \omega_n^2}{EI} \right)^{\frac{1}{4}}. \quad (6)$$

Форма кривой связана с формой моды, а каждое решение задачи перемещения называется модой. Термин  $\beta_n$  связан с различными параметрами, которые зависят от свойств материала, геометрических свойств и собственной частоты балочных конструкций. На всю балочную конструкцию влияет жесткость на изгиб, поэтому любые изменения в балке в определенной области могут зависеть от изменения значений жесткости на изгиб. В результате, в области дефекта будут меняться значения  $\beta_n$ . Таким образом, о поврежденном состоянии можно узнать, сравнив значения  $\beta_n$  в бездефектном и дефектном состоянии конструкций. Во всех случаях результаты расчета формы колебаний используются для прогнозирования дефектов на основе кривизны, используя индекс дефекта кривизны для определения участков повреждения.

## 2.2. Амплитудно-частотная характеристика

Физические изменения в конструкциях могут произойти в результате повреждения, что приводит к изменению динамического отклика конструкции. Использование АЧХ является целесообразным методом для рассмотрения динамических особенностей структуры. Для системы с несколькими степенями свободы уравнение динамического равновесия выглядит так:

$$[M]\{\ddot{u}_t\} + [C]\{\dot{u}_t\} + [K]\{u_t\} = \{F_t\}, \quad (7)$$

где  $[M]$ ,  $[C]$  и  $[K]$  представляют собой  $n \times n$  матрицы массы, демпфирования и жесткости соответственно. Применяя быстрое преобразование Фурье (БПФ) к АЧХ, можно получить следующие формулы [10]:  $\dot{u}_t$ ,  $\ddot{u}_t$  и  $u_t$  — ускорение, скорость и перемещение соответственно.

Внешняя сила и перемещение также выражаются следующим образом:

$$\begin{aligned}\{F_t\} &= \{F_\omega\} e^{j\omega t}, \\ \{X_t\} &= \{X_\omega\} e^{j\omega t}.\end{aligned}\quad (8)$$

Уравнение (7) записывается в виде:

$$\{-\omega^2 [M] + i\omega [C] + [K]\{X_\omega\}\} e^{j\omega t} = \{F_\omega e^{j\omega t}\}.\quad (9)$$

Обозначим  $H_\omega$  как

$$[H_\omega] = \frac{1}{-\omega^2 [M] + i\omega [C] + [K]}.\quad (10)$$

Преобразуем уравнение (9):

$$H_\omega = \frac{X_\omega}{F_\omega},\quad (11)$$

где  $\omega$  — это скалярная величина.

### 2.3. Значение функции когерентности в извлечении АЧХ

Функция когерентности — это спектр, который часто используется в сочетании со случайным или импульсным возбуждением. Она может использоваться для быстрой оценки качества АЧХ и, зачастую, для поиска нелинейности в определенных частотных полосах или резонансных областях. Это, пожалуй, наиболее часто применяемая процедура проверки на нелинейность, поскольку практически все коммерческие анализаторы спектра имеют программное обеспечение, которое позволяет оценить ее величину.

Перед оценкой нелинейности будет рассчитана функция когерентности для линейных систем с шумом при измерениях на выходе. Уравнение движения во временном интервале для такой системы выглядит следующим образом:

$$x(t) = S[f(t)] + m(t),\quad (12)$$

где  $S$  — символ оператора, иллюстрирующего структурные характеристики, такие как упругость, инерция и диссипация энергии,  $m(t)$  — уровень шума в АЧХ. Простая алгебраическая операция позволяет представить функцию когерентности в диапазоне частот в виде:

$$\gamma^2 = \frac{|H_\omega|^2 S_{ff}(\omega)}{S_{xx}(\omega)} = 1 - \frac{S_{mm}(\omega)}{S_{xx}(\omega)},\quad (13)$$

где  $H_\omega$  — амплитудно-частотные характеристики, а  $S_{ff}(\omega)$ ,  $S_{xx}(\omega)$  и  $S_{mm}(\omega)$  обозначают спектральную функцию на входе, отклик и шум соответственно. Это доля выходной мощности, которая может быть линейно связана с входными данными,  $\gamma^2$  всегда лежит в интервале от 0 до 1 ( $0 \leq \gamma^2 \leq 1$ ). Если  $S_{mm}(\omega) = 0$ , то  $\gamma^2 = 1$ , что указывает на отсутствие шума измерения в измеренных выходных данных,  $\gamma^2 < 1$  указывает на наличие шумов измерения в измеряемых выходных данных.

Любые отклонения от единицы будут заметны, если построить график когерентности как функцию от собственной частоты ( $\omega$ ). Все значения во втором члене уравнения (13) можно легко оценить с помощью коммерческих анализаторов спектра, предназначенных для оценки  $H_\omega$ , именно поэтому измерение когерентности так часто встречается в стандартных приборах.

## 2.4. Кривизна формы колебаний

Кривизна элемента при определенной площади поперечного сечения ( $A$ ) определяется с помощью жесткости на изгиб ( $EI$ ) и изгибающего момента ( $M$ ):

$$y'' = \frac{M}{EI}. \quad (14)$$

Кривизна наглядно демонстрирует, что если повреждена определенная область балки, то кривизна, соответственно, будет отличаться в месте повреждения. Полученные данные АЧХ используются для расчета кривизны формы колебаний, что позволяет определить одно место повреждения в консольной балке с опорой. Бездефектные и дефектные балки описаны в данной статье с использованием модальных данных, которые были получены экспериментально. При использовании модуля MATLAB ANN сгенерированная форма колебаний обучается для повышения точности прогнозирования. Согласно [10], модальные параметры используются для расчета кривизны формы колебания с помощью метода центральных разностей:

$$(H_{\omega})_i^n = \frac{(H_{\omega})_{i+1} - 2(H_{\omega})_i + (H_{\omega})_{i-1}}{h^2}, \quad (15)$$

$$\left| (\Delta H_{\omega})_i^n \right| = \left| \left[ (H_{\omega})_i^n \right]^d - \left[ (H_{\omega})_i^n \right]^u \right|. \quad (16)$$

Амплитудно-частотная характеристика применяется для определения абсолютного индекса дефекта кривизны в случае бездефектной и дефектной конструкции:

$$ACDI = \left| \frac{\left[ (H_{\omega})_i^n \right]^d - \left[ (H_{\omega})_i^n \right]^u}{\left[ (H_{\omega})_i^n \right]^u} \right|. \quad (17)$$

## 2.5. Применение ИНС-моделирования

Для описания нелинейного функционального отображения между набором входных и выходных модальных параметров целесообразно использовать нейронную сеть с прямой связью. Нелинейная функция нескольких переменных характеризуется функцией активации как суперпозиция нелинейных функций отдельных переменных [29].

Нейронная сеть с обратным распространением содержит три слоя: входной, скрытый и выходной. Скрытый слой обрабатывает данные измеренной АЧХ входного слоя перед тем как выходной слой предоставит точные результаты. В данном исследовании использовался алгоритм Левенберга—Марквардта (`trainlm`) и прямое—обратное распространение, как описано в [33]. Для оценки результатов выбран только один из скрытых слоев с дифференцируемой функцией активации `logsig`. В исследовании [34] для определения оптимальной сети для конкретных масивов данных используется диапазон от 2 до 25 скрытых слоев. Наилучшие результаты достигаются при использовании обучающих наборов данных, где значение среднеквадратического отклонения (СКО) должно быть меньше 0,001, среднее абсолютное отклонение (САО) меньше 5 %, а значения коэффициента регрессии больше 0,98. В разделе 2.4 приведены уравнения для определения статистических ошибок. Модель не может быть переобучена, поскольку процесс обучения заканчивается при увеличении ошибки достоверности. Перед обучением сети с помощью выражения (21), используемого в [35], проводится нормализация данных в диапазоне от 0,1 до 0,9. Перед обучением наборы данных распределяются по трем секциям: 70 % для обучения, 15 % для валидации, а оставшиеся 15 % данных выбираются для тестирования:

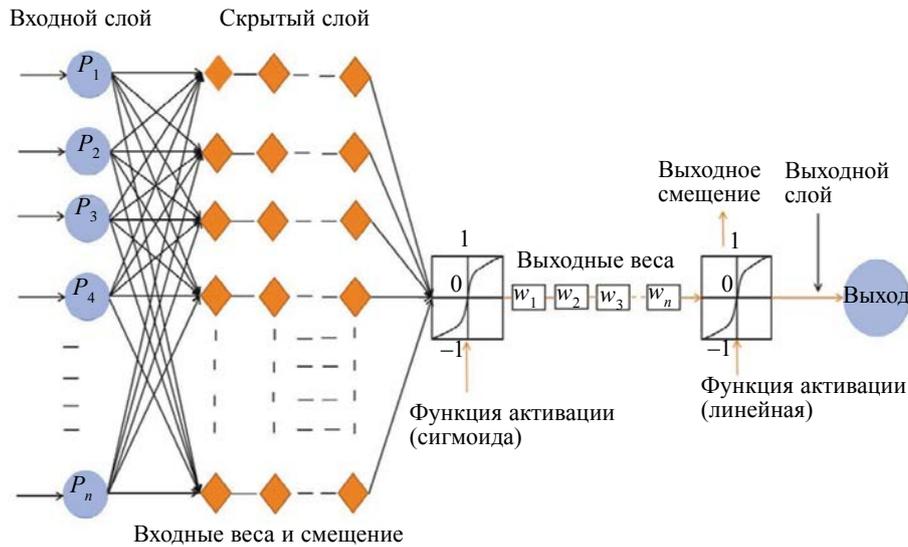


Рис. 2. Модель ИНС с обратным распространением.

$$MSE = \frac{1}{v} \times \left\{ \sum_{k=1}^v (n_k - n_p)^2 \right\}; \quad (18)$$

$$MAPE = \left\{ \frac{1}{v} \times \sum_{k=1}^v \left| \frac{(n_k - n_p)}{n_k} \right| \right\} \times 100 \%; \quad (19)$$

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum_{k=1}^v (n_k - n_p)^2}{\sum_{k=1}^v n_p}}, \quad (20)$$

где  $v$  — суммарные выходные данные;  $n_k$  и  $n_p$  — экспериментальное и прогнозируемое значения соответственно.

$$N_k = 0,1 + \left\{ 0,8 \times \left( \frac{Y_k - Y_{k, \min}}{Y_{k, \max} - Y_{k, \min}} \right) \right\}, \quad (21)$$

$N_k$  — нормализованные точки данных;  $Y_k$  — массив данных;  $Y_{k, \max}$  и  $Y_{k, \min}$  — максимальная и минимальная точки данных в массиве соответственно.

### 3. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Консольная балка с опорой, изготовленная из конструкционной стали, подвергается лабораторным исследованиям по изменению динамических свойств. Выбирается профильная балка с прямоугольным поперечным сечением длиной 2000 мм, показанная на рис. 3а. Внешний размер ( $b \times d$ ) поперечного сечения составляет  $25 \times 50$  мм, а внутренний размер поперечного сечения —  $21 \times 46$  мм. Толщина стенки балки составляет 2 мм. Все размеры поперечного сечения показаны на рис. 3б.

Эксперимент проводился над консольной профильной балкой с опорой, имеющей плотность  $7850 \text{ кг/м}^3$ , модуль упругости 200 ГПа и коэффициент Пуассона 0,29. Один конец балки жестко



Рис. 3. Образец балки: профильная балка длиной 2000 мм (а); размеры поперечного сечения балки (б).

зафиксирован болтами на стержне, который закреплен в бетоне, а другой конец опирается на роликовую опору, как показано на рис. 5.

Экспериментальная установка состоит из консольной балки с опорой и устройства В&К. Устройство имеет пять входных каналов, которые могут соединяться с акселерометром и ударным молотком. Одноосный акселерометр DeltaTorn и ударный молоток подключаются через канал с модальными номерами, заданными как 4507 001 и 8206 003. Для получения всех необходимых данных эксперимент проводится с использованием четырех акселерометров и ударного молотка. В модельной балке создаются двадцать шесть узловых точек с интервалом 80 мм между двумя последовательными узлами. Возбуждение прикладывается на каждый из узлов для регистрации отклика для каждой узловой точки.

Для измерения необходимых модальных параметров балки создана испытательная установка с применением устройства В&К. В данном эксперименте анализатор АЧХ используется для определения собственной частоты, форм колебаний и модального ускорения. На рис. 3а показан образец балки, а на рис. 4а — образец с различным глубиной надреза. Места повреждений показаны на рис. 4б, в на промоделированной балке.

В данной работе используются ударный молоток и акселерометр. Акселерометр и ударный молоток используются для малых и средних размеров конструкции. Акселерометр (4507 001) обладает высокой чувствительностью для обнаружения даже небольших импульсов в конструкции для извлечения модальных параметров. Конструкция акселерометра изготовлена таким образом, что устройство из-за собственного веса никаким образом не влияет на АЧХ. В программной настройке область собственной частоты и частотных линий рассматривается как 210 Гц и 168 линий. Правильное расположение испытуемого образца создается в лаборатории в определенных условиях. В процессе подготовки образец разделяется на 25 элементов и 26 узлов. При первом ударе акселерометр DeltaTorn с помощью клея прикрепляется к нижней поверхности образца в четырех различных узлах. Далее меняются положения акселерометров на другие четыре положения, и снова записывается частотная характеристика. Процесс повторяется несколько раз, чтобы завершить сбор данных для каждого из узлов. В процессе извлечения модальных параметров неповрежденная и поврежденная конструкции закрепляются надлежащим образом с помощью торцевых опор. В первой части эксперимента бездефектная балка используется для получения набора модальных параметров, затем балки с дефектами используются для проведения того же эксперимента. Для получения более точных результатов эксперимент повторяют 4-5 раз и определяют показатель когерентности для получения точных данных частотной характеристики. Когерентность находится в диапазоне от 0 до 1, причем 0 означает наихудшее качество данных с максимальным содержанием шума, а 1 — высокое качество данных с очень низким уровнем шума. Низкое и высокое качество данных зависит от шума, присутствующего в извлеченной функции отклика. Дефектная балка подвергается той же процедуре измерений, что и бездефектная, и так же получают данные АЧХ. Различные дефекты появляются в балке с помощью пропилов различной глубины: 5, 10, 15, 20 и 30 мм, как показано на рис. 4а, в. Измеренная АЧХ затем используется для построения формы колебаний модели консольной балки с опорой.

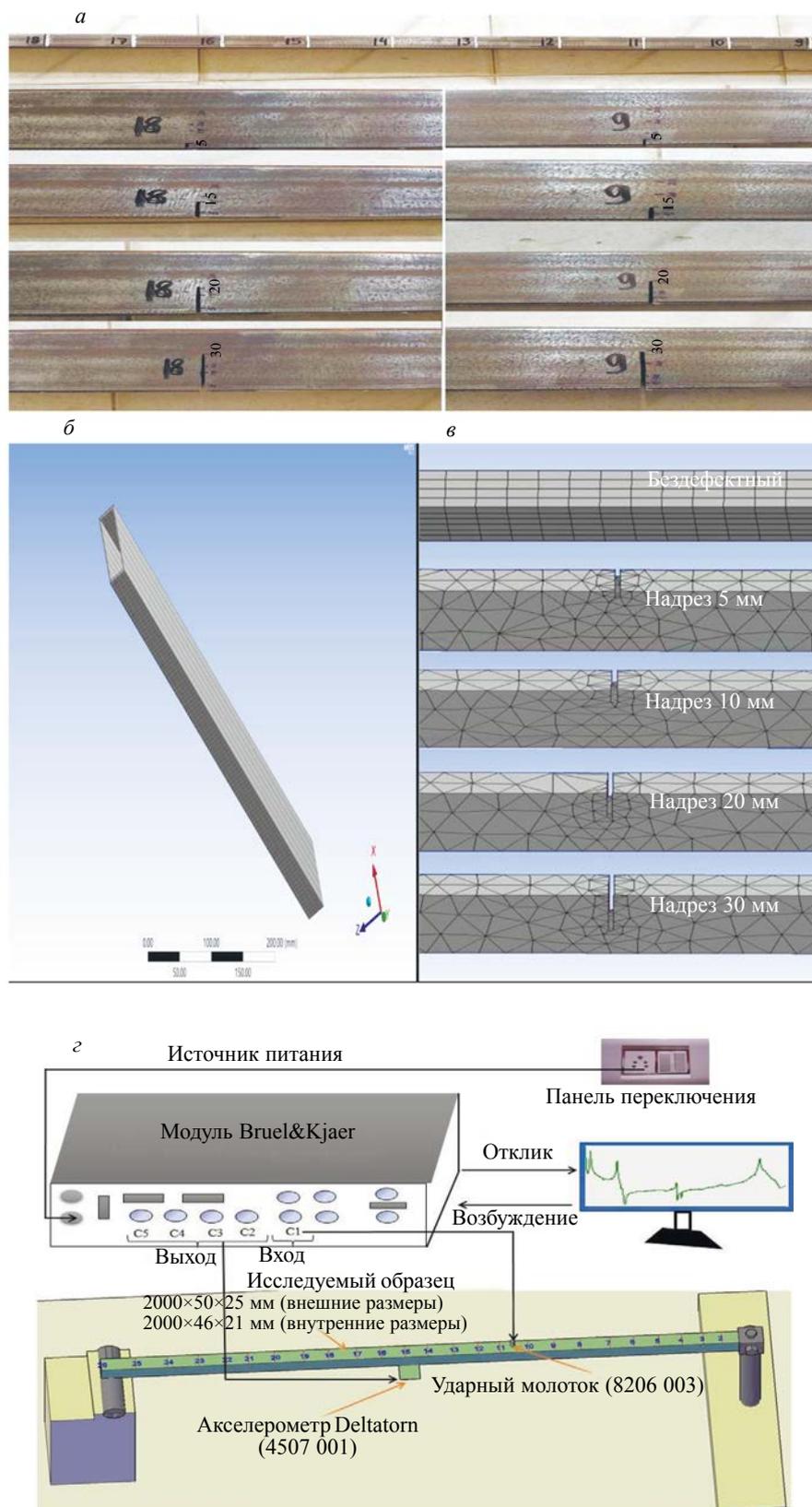


Рис. 4. Экспериментальная установка: реальный образец балки с различными глубинами надрезов (а); смоделированная балка (б); модель балки с надрезами различной глубины (в); линейная схема экспериментальной установки (г).

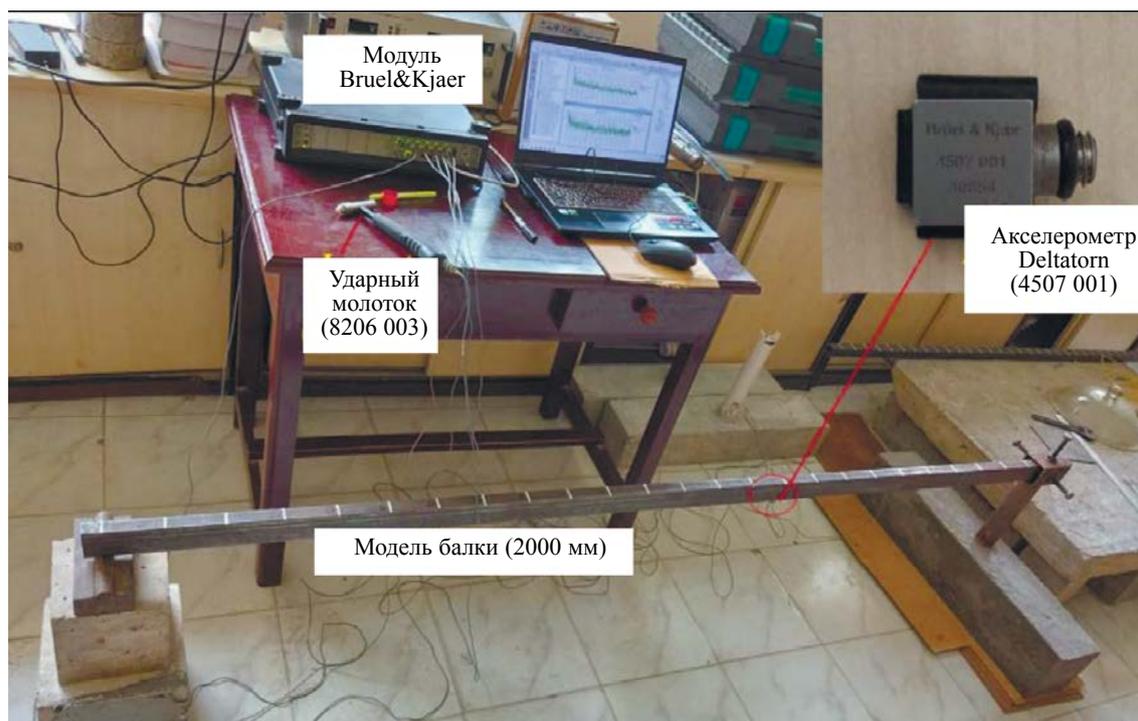


Рис. 5. Экспериментальная установка Briel &amp; Kjaer.

### 3.1. Моделирование методом конечных элементов

В данном исследовании используют конечно-элементная модель для подтверждения надежности предложенного метода. В этом разделе освещаются некоторые важные параметры, такие как материальное уравнение, тип элементов, обоснования для выбора элементов и их размеров, граничные условия и время вычислений.

**Материальное уравнение.** Материальное уравнение — это уравнение, которое описывает отклик материала. Каждому механизму соответствует отдельное материальное уравнение.

Материальное уравнение для модели балки в ANSYS Workbench обычно определяется уравнением (14). Соответствующие параметры обозначаются как модуль упругости ( $E$ ), момент инерции ( $I$ ) и изгибающий момент ( $M$ ).

**Определение элемента и его размеров.** Описание элемента задает тип элемента и связанную с ним математическую модель, которая используется для описания поведения анализируемого материала. Размер элемента задает величину разбиения модели на более мелкие части, которые используются для решения определяющих уравнений при моделировании. Описание элемента влияет на точность моделирования, так как определяет способ моделирования свойств материала и его поведения. Различные типы элементов имеют разные уровни точности, вычислительные затраты и пригодность для различных типов анализа. Размер элементов влияет на точность моделирования, поскольку определяет уровень детализации модели. Если элементы слишком большие, модель может не учесть важные детали, что приведет к неточному расчету.

**Граничные условия.** Граничное условие для консольной балки с опорой приведено ниже в уравнении.

На неподвижном участке:

$$x = 0, \quad w = 0 \quad \text{и} \quad \frac{d^2w}{dx^2} \neq 0.$$

На шарнирно-закрепленном участке:

$$x = L, \quad w = 0 \quad \text{и} \quad \frac{d^2w}{dx^2} = 0. \quad (22)$$

## 4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### 4.1. Применение функции когерентности

Наличие нелинейности в функции частотного отклика может быть установлено путем наблюдения за изменениями функции когерентности для различных состояний конструкций или различных глубин дефектов.

Графики когерентности представлены на рис. 6а—в и показывают изменение пиков по всему диапазону частот. Пики смещаются в направлении более низких частот из-за изменений, произошедших в конструкциях. На рис. 6б, в показаны масштабированные графики когерентности в конкретном диапазоне частот. Сдвиг частоты возникает из-за потери жесткости при изгибе. Экспериментально полученные собственные частоты представлены в табл. 1 для разных дефектов. Хорошо видно, что пики когерентности смещаются в сторону более низкой собственной частоты с увеличением глубины надреза.

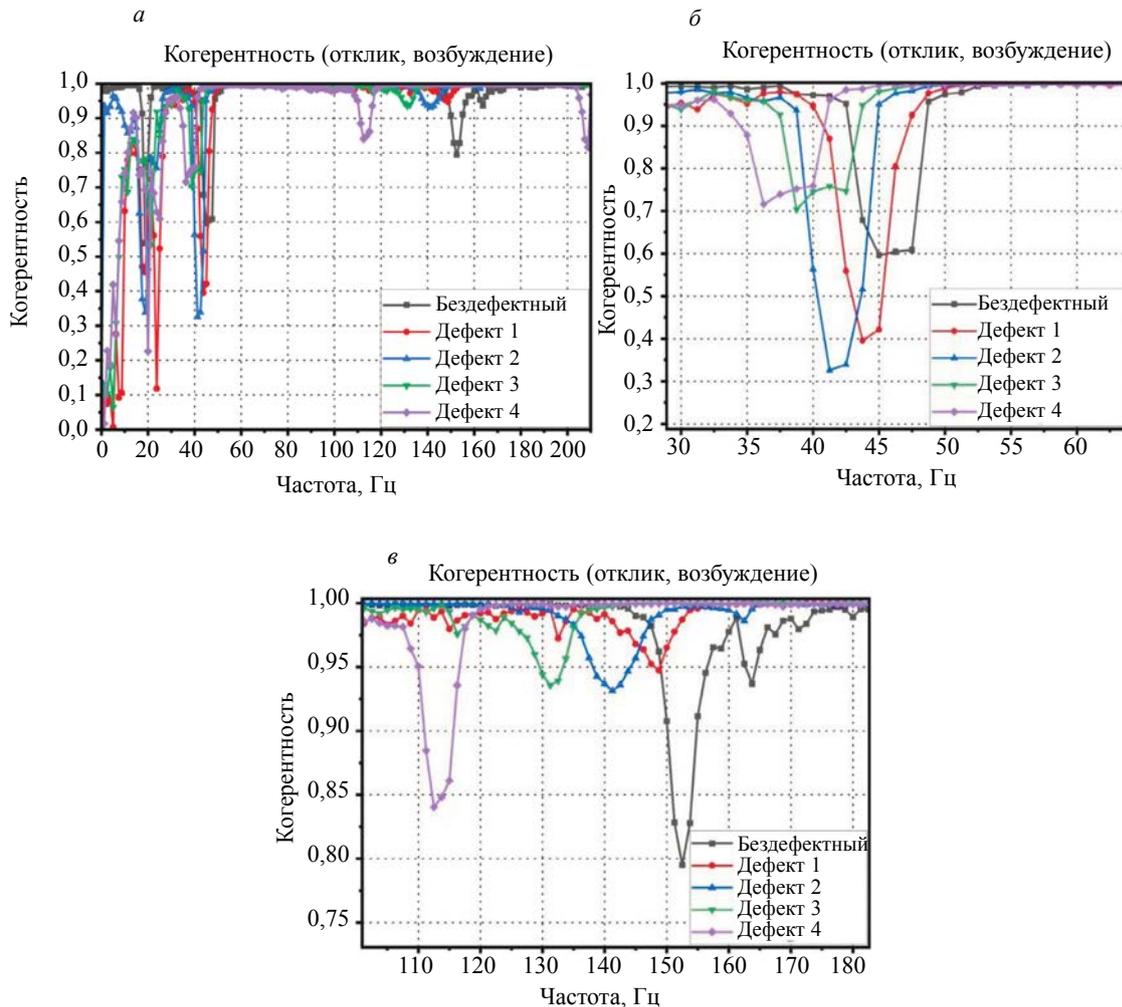


Рис. 6. График когерентности с различными дефектами: 0—210 Гц (а); график когерентности в диапазоне 30—55 Гц (б); график когерентности в диапазоне 105—180 Гц (в).

Значение когерентности становится меньше 1 с увеличением глубины повреждения в диапазоне частот 0 — 60 Гц. Значение когерентности может снижаться только из-за вносимых повреждений или из-за внешних помех во время эксперимента.

Таблица 1

## Экспериментально полученные данные собственных частот при различных повреждениях

№ п/п	Номер дефекта	Собственная частота		Изменение (уменьшение) собственных частот, %	
		Мода 1	Мода 2	Мода 1	Мода 2
1	Бездефектный	46,25	151,30	–	–
2	Дефект 1	44,75	147,50	–3,243	–2,512
3	Дефект 2	42,50	141,30	–8,108	–6,609
4	Дефект 3	40,00	133,80	–13,513	–11,566
5	Дефект 4	37,50	113,80	–18,919	–24,785

## 4.2. Применение функции частотного отклика

Качество частотного отклика зависит от функции когерентности. На наличие структурных дефектов указывает ухудшение качества частотной характеристики или наличие шума в данных частотной характеристики. В программной конфигурации область частот и частотные линии в рамках данного эксперимента были заданы равными 210 Гц и 168 линиям соответственно. В данной области частот и линий для указанной модели балки возможны только две моды. На рис. 7б пик в определенной частотной области отмечен как мода модели балочной структуры. Измеренная АЧХ дает несколько показателей, которые могут быть использованы для прогнозирования возникновения каких-либо структурных изменений. Такие показатели АЧХ, как смещение собственных частот и изменение резонансных пиков, были использованы для исследования двухэтажной каркасной модели. Используя разницу между неповрежденными и поврежденными АЧХ-данными, можно было спрогнозировать наличие и расположение дефектов в балке [37]. При исследовании консольной балки из профильной трубы были получены наборы АЧХ-данных для случаев при наличии и отсутствии дефектов. Логарифмическая АЧХ показана на рис. 7а для случаев при наличии и отсутствии дефектов, глубина надреза 5 мм в узлах 9 и 18, 10 и 15 мм в узлах 9 и 18, срез 20 мм в узлах 9 и 18 и срез 30 мм в узлах 9 и 18. Это также показывает, что из-за жесткого поведения конструкции, изменение частоты между бездефектной балкой и балкой с дефектом 1 довольно мало. Мнимый график АЧХ показан на рис. 7б, который показывает изменение даже при небольшом повреждении.

На рис. 6 показано, что качество данных частотного отклика зависит от качества когерентности. Качество когерентности зависит от различных факторов, таких как величина возбуждения, окружающая среда, человеческий фактор и т.д.

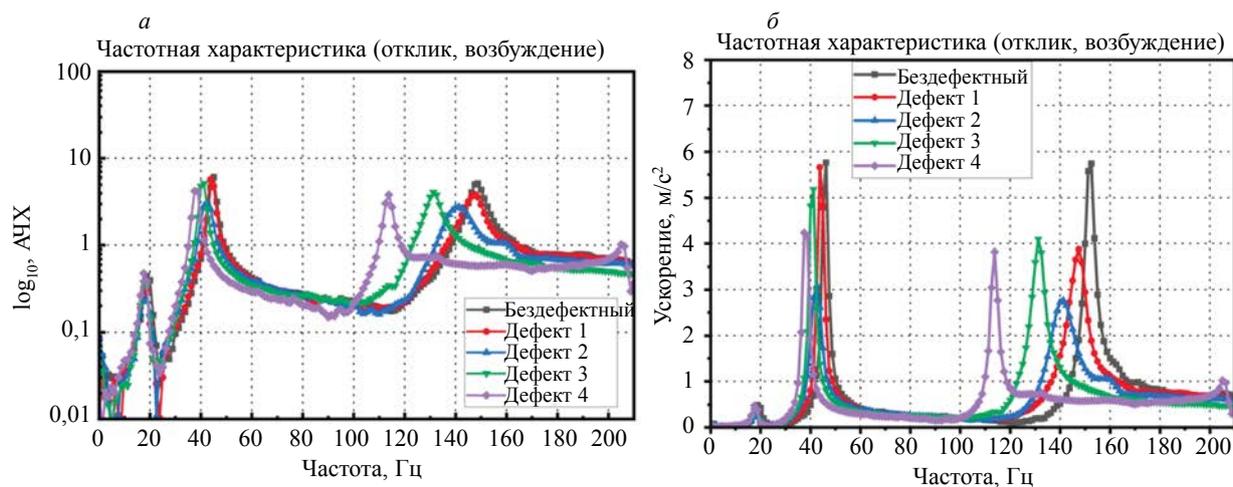


Рис. 7. График логарифмической АЧХ (а); график мнимой АЧХ (б).

Положение пиков АЧХ изменяются у разных дефектов в модели балки. При увеличении глубины надрезов значения частоты смещаются в сторону все более меньших значений, как показано на рис. 6.

Наличие шума в частотной характеристике может привести к получению искаженных данных частотной характеристики, которые могут оказаться неприемлемыми для корректного выявления расположения дефектов в изделии. В случае идеального проведения эксперимента в лаборатории частотная характеристика не содержит большого количества шума. Рис. 6 демонстрирует наличие шума из-за внешних помех, который можно наблюдать в диапазоне частот от 0 до 60 Гц. В диапазоне частот от 0 до 60 Гц значение когерентности уменьшается по мере увеличения глубины надреза. На рис. 7а представлены графики зависимости логарифмической АЧХ от частоты для различных дефектов, которые показывают смещение пиков на всем диапазоне частот. На рис. 7б можно увидеть изменение амплитуды, соответствующее собственной частоте. В диапазоне частот от 20 до 60 Гц значение амплитуды соответствует моде 1, а в диапазоне частот от 100 до 160 Гц — моде 2 в определенной области балки.

### 4.3. Прогнозирование повреждений с помощью собственных частот

Наличие повреждений можно выявить с помощью данных о собственной частоте, поскольку изменение частоты происходит из-за структурных изменений. Предыдущие исследования показали возможность применения собственной частоты для количественной оценки наличия повреждений и степени повреждений в различных модельных конструкциях. В настоящем исследовании поведение конструкции характеризуется с помощью собственной частоты, что показывает способность исследовать наличие и степень повреждений.

Результаты численного расчета собственных частот представлены в табл. 2, которые демонстрируют наличие повреждений в модели балки профильной трубы. Дефектами являются различные надрезы в известных местах в балке. Дефекты были сделаны в балок в узловых точках 9 и 18. Глубина надрезов в узлах 9 и 18 составляет 5, 10, 15, 20 и 30 мм. Как видно из табл. 2, изменение собственных частот возникает при численном расчете частот. При различных дефектах собственные частоты снижаются по мере увеличения глубины надреза в балке.

Таблица 2

Результаты численного расчета собственных частот при различных уровнях повреждений

№ п/п	Номер дефекта	Собственная частота		Изменение (уменьшение) собственных частот, %	
		Мода 1	Мода 2	Мода 1	Мода 2
1	Бездефектный	48,889	157,25	–	–
2	Дефект 1	48,419	155,20	–0,961	–1,304
3	Дефект 2	47,138	151,72	–3,582	–3,517
4	Дефект 3	46,234	145,68	–5,431	–7,358
5	Дефект 4	42,065	128,24	–13,958	–18,448

Повреждения балки представляют собой такие случаи, как бездефектная балка, балка с повреждением 10 %, балка с повреждением 25 %, балка с повреждением 40 % и балка с повреждением 60 % от общей толщины модели балки.

Собственные частоты аналитической модели балки представлены для различных случаев повреждения. Собственные частоты рассчитываются с помощью уравнения (16) для модели бездефектной балки. Дальнейшее исследование осуществляется для расчета собственных частот для поврежденной балки путем введения изменений момента инерции ( $I$ ) в определенном месте. В связи с изменением момента инерции собственные частоты рассчитываются с помощью уравнения (16). В табл. 3 показано изменение собственных частот для различных случаев дефектов.

Таблица 3

Данные собственных частот, полученные аналитическим путем, при различных уровнях повреждений

№ п/п	Номер дефекта	Собственная частота		Изменение (уменьшение) собственных частот, %	
		Мода 1	Мода 2	Мода 1	Мода 2
1	Бездефектный	49,965	153,293	–	–
2	Дефект 1	49,236	150,695	–1,4590	–1,6948
3	Дефект 2	47,963	143,439	–4,0068	–6,4282
4	Дефект 3	46,873	134,153	–6,1883	–12,4859
5	Дефект 4	43,469	115,968	–13,0011	–24,3488

#### 4.4. Определение формы мод при контроле дефектов

Была исследована балка из профильной трубы с целью выявления формы поперечной моды для различных дефектов. Исследование выполнено на четырех различных дефектах, выполненных путем нанесения глубоких надрезов с помощью режущего инструмента. Результаты определения экспериментальных и численных данных формы мод позволяют определить место повреждения в балке. Формы мод с различными дефектами представлены на рис. 8 и 9.

##### 4.4.1. Формы мод, полученные экспериментальным путем для образца консольной балки с опорой

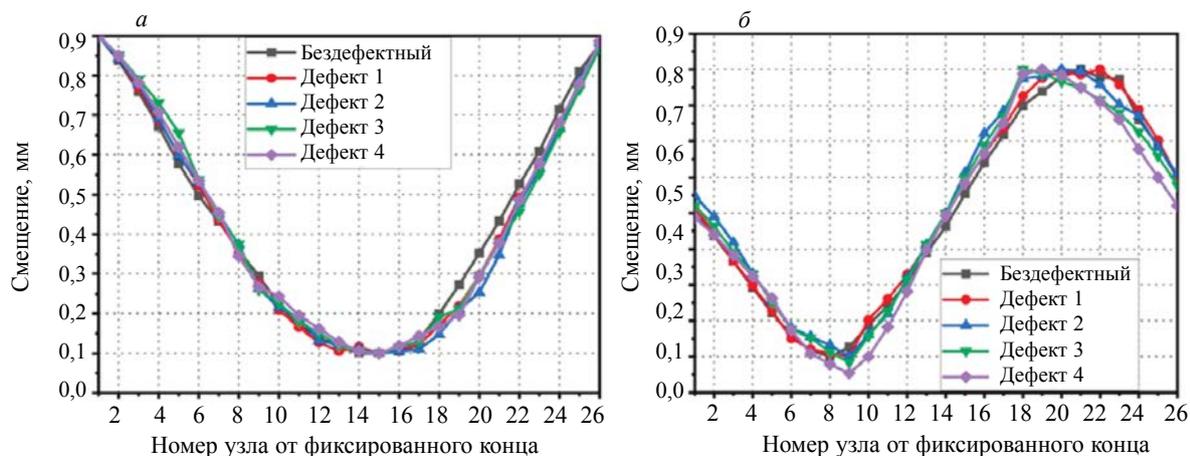


Рис. 8. Формы мод, полученные экспериментально, для моделей бездефектной и дефектной балок: форма первой моды (а); форма второй моды (б).

##### 4.4.2. Формы мод, полученные численным методом для образца консольной балки с опорой

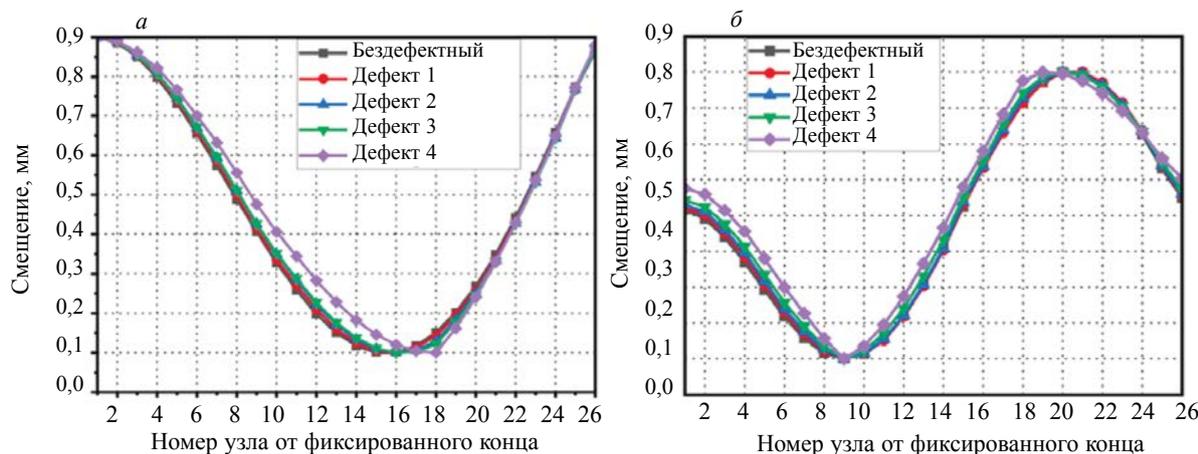


Рис. 9. Формы мод, полученные экспериментально, для моделей бездефектной и дефектной балок: форма первой моды (а); форма второй моды (б).

4.4.3. Форма моды образца балки, полученная с помощью МКЭ (форма первой моды на различных дефектах)

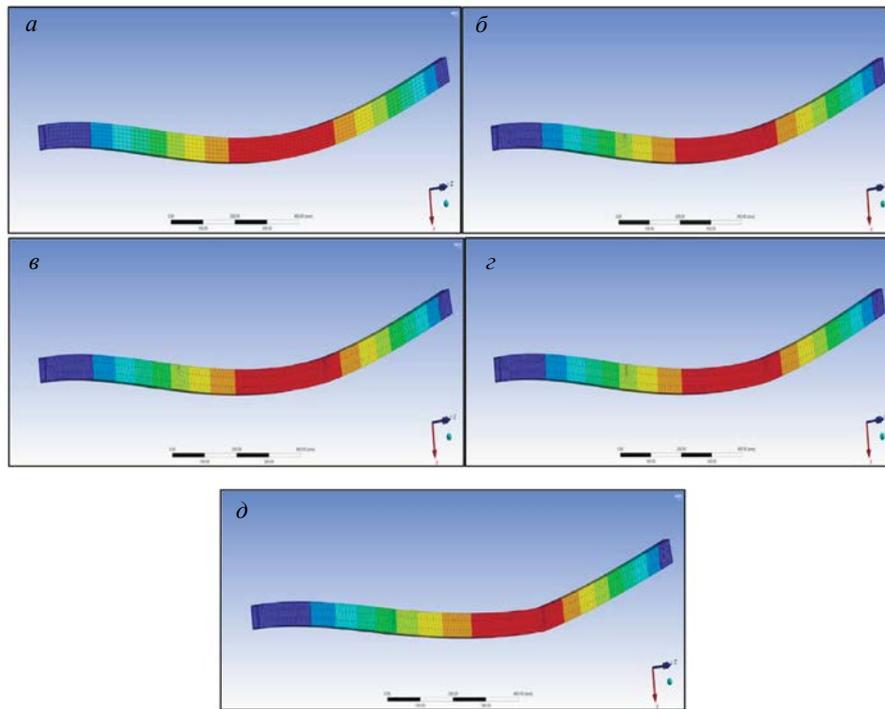


Рис. 10. Форма первой поперечной моды модели балки с различной глубиной повреждения.

4.4.4. Форма моды образца балки, полученная с помощью МКЭ (форма второй моды на различных дефектах)

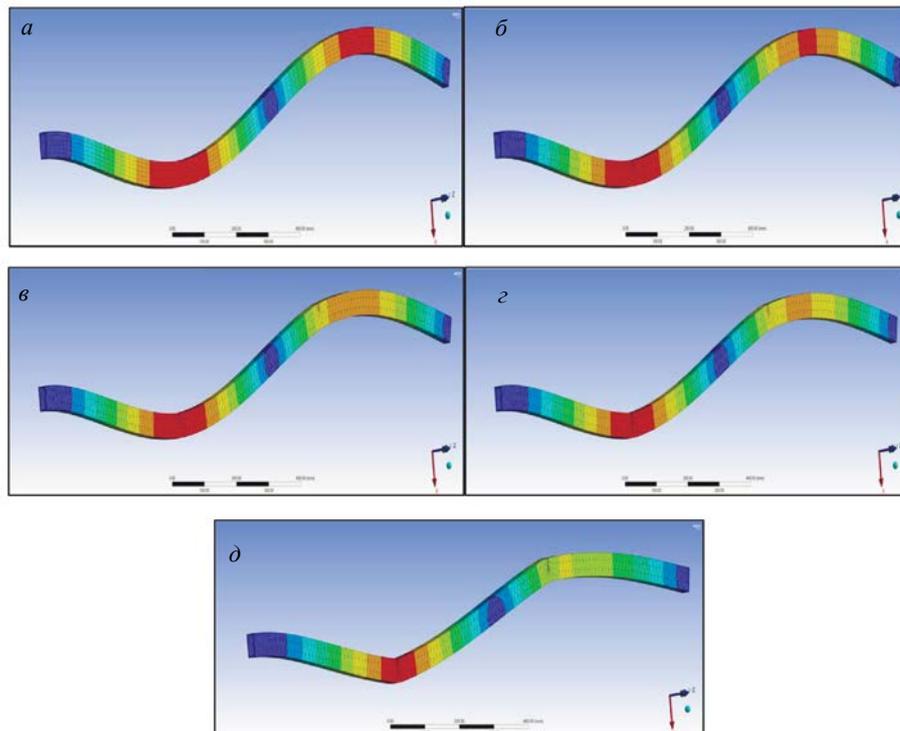


Рис. 11. Форма второй моды модели балки с различной глубиной повреждения.

В разделе 3.1 были рассмотрены такие понятия, как материальное уравнение, причины для определения элементов и их размеров, граничные условия. Конечно-элементная модель с тетраэдрическим элементом с десятью узлами создана с помощью программного пакета ANSYS 17.2. Модель создана для получения собственных частот и формы мод модельной конструкции. Для конкретной модельной конструкции требуемое время вычислений составляет 6 с.

#### 4.4.5. Формы мод, полученные аналитическим путем, для образца консольной балки с опорой

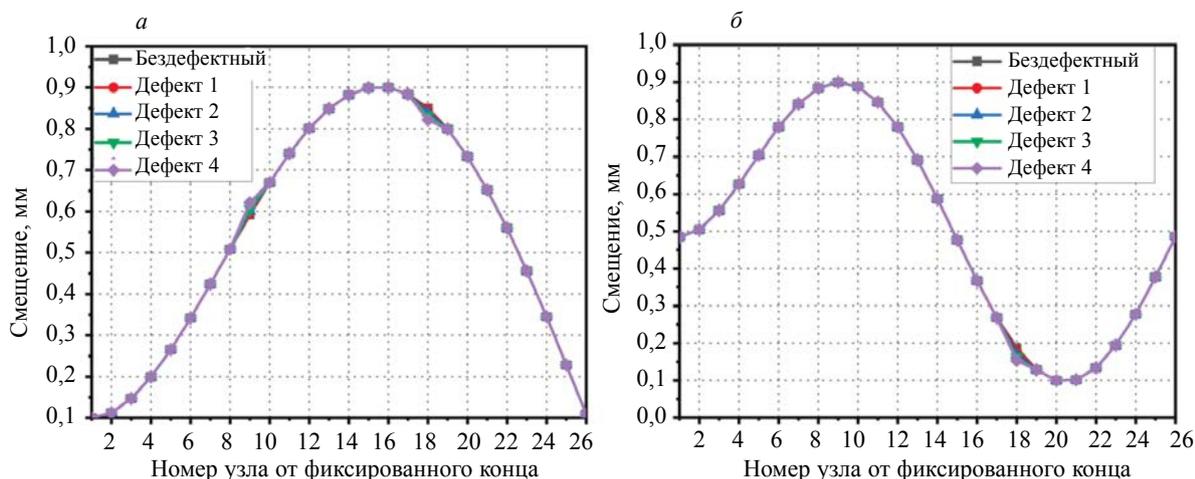


Рис. 12. Формы мод, полученные аналитическим путем, для моделей бездефектной и дефектной балок: форма первой моды (а), форма второй моды (б).

В данном исследовании представлены первые две формы поперечных мод для определения места дефекта и степени дефекта в балке из профильной трубы с консольной опорой. На рис. 8 показана экспериментально полученная форма моды, как и на рис. 9; численно полученная форма моды представлена с помощью линейной диаграммы. На рис. 10 и 11 показана МКЭ-модель первой и второй форм мод в изделии. Рис. 10 и 11 включают пять моделей МКЭ, которые представляют данные от пяти различных дефектов. На рис. 12 представлена форма мод консольной балки с опорой, полученная аналитическим путем.

### 4.5. Прогнозирование места дефекта без использования искусственных нейронных сетей

Для определения индекса дефекта кривизны консольной балочной конструкции с опорой непосредственно используются формы мод, полученные с помощью данных частотной характеристики, и численно полученные данные форм мод. Результаты показывают, что экспериментально полученные данные имеют меньшую эффективность в обнаружении дефектов, в то время как численно полученные результаты эффективны для локализации места дефекта в консольной балке с опорой. Причину неточности результатов можно объяснить тем, что экспериментальные результаты содержат производственные и внешние шумы во время эксперимента. Численно полученные результаты обладают хорошей точностью при обнаружении мест дефектов благодаря идеально полученным формам мод.

#### 4.5.1. Индекс дефекта кривизны, определенный экспериментально с использованием исходных данных

Для того чтобы определить место дефекта в модели балки сначала необходимо выполнить ряд определенных действий. Измеренные данные частотной характеристики используются для получения формы колебаний модельной конструкции. Форма моды смещения применяется для определения кривизны формы моды. Затем кривизна формы моды используется для расчета индекса дефекта кривизны, который позволяет определить расположение дефекта в модельной конструк-

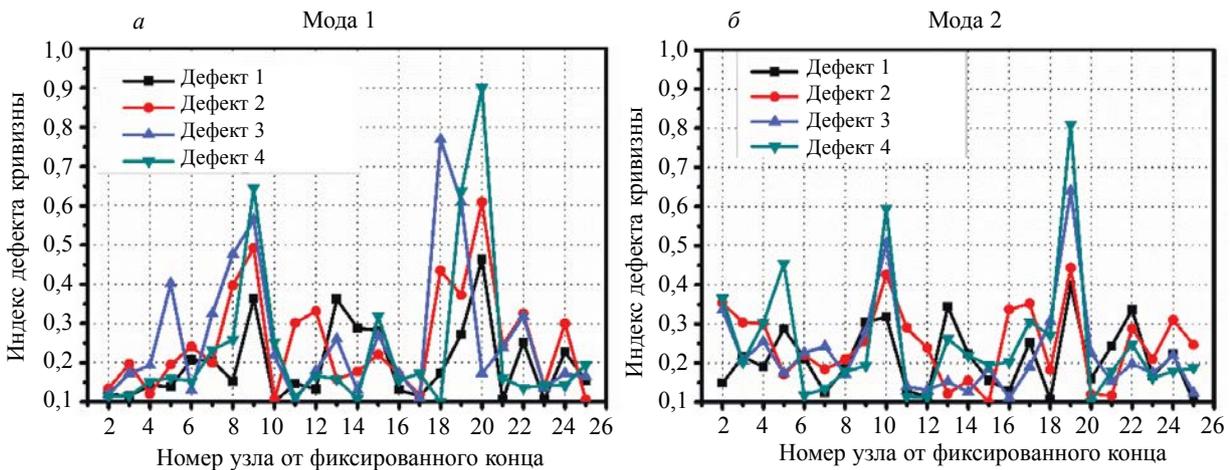


Рис. 13. Индекс дефекта кривизны на основе экспериментальных исходных данных: индекс дефекта кривизны для моды 1 (а); индекс дефекта кривизны для моды 2 (б).

ции. На рис. 13а, б показан индекс дефекта кривизны, полученный экспериментально с помощью кривизны формы моды, который показывает расположение дефекта в конструкции балки. График содержит ряд нежелательных пиков, которые снижают точность определения точного расположения дефекта в балочной конструкции. Расположение дефекта может быть выявлено на графике, но нежелательные пики не должны преобладать, чтобы не снижать точность определения положения дефекта. Нежелательные пики могут возникать из-за недостаточной точности сбора данных или помех окружающей среды. Раздел 4.5.2 содержит аналитически рассчитанный индекс дефекта кривизны с целью определения расположения дефекта в модели балки. Аналитически полученные результаты представлены на рис. 14 для сравнения с экспериментально полученными, представленными на рис. 13. Далее будет показано, как данные частотной характеристики обрабатываются с помощью искусственной нейронной сети для уменьшения погрешности данных и устранения нежелательных пиков из полученных результатов.

#### 4.5.2. Индекс дефекта кривизны, полученный аналитическим путем

На рис. 14 представлен аналитически рассчитанный индекс дефекта кривизны с целью определения расположения дефекта в консольной балке с опорой. Точное расположение дефектов в нескольких местах самой балки определяется на основе аналитически полученных модальных данных.

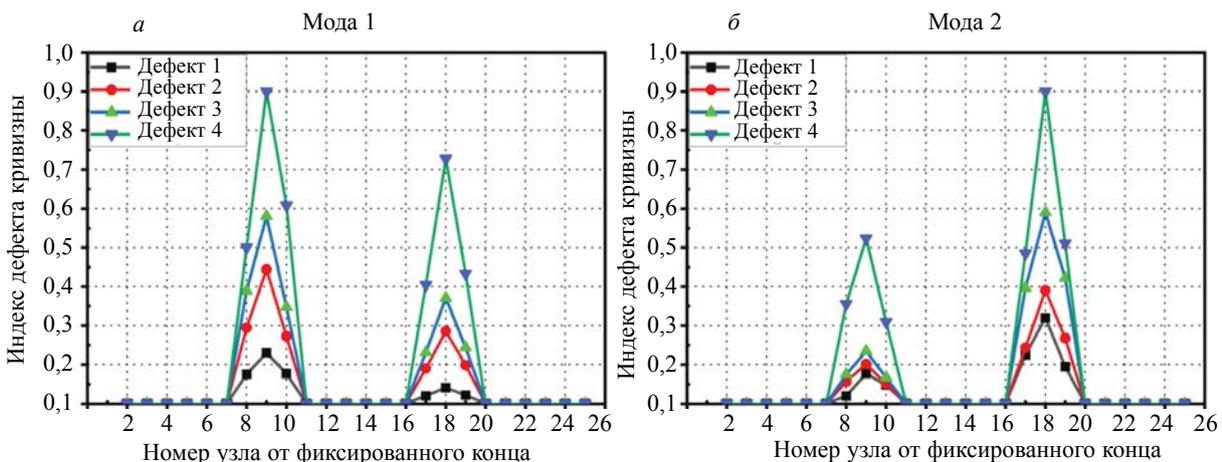


Рис. 14. Индекс дефекта кривизны с использованием аналитических данных: индекс дефекта кривизны для моды 1 (а); индекс дефекта кривизны для моды 2 (б).

#### 4.5.3. Индекс дефекта кривизны, полученный численным методом на основании исходных данных

На рис. 15 график индекса дефекта кривизны построен с использованием модальных данных на основе МКЭ, который не содержит каких-либо ошибок, и месторасположение дефекта идеально определяется без дополнительной обработки. В результатах, полученных на основе МКЭ, нет необходимости в дальнейшем анализе, а исходных данных вполне достаточно для определения точного места дефекта в модельных конструкциях. В качестве исходных данных при анализе рассматриваются модальные данные от бездефектной балки и определяется индекс дефекта кривизны.

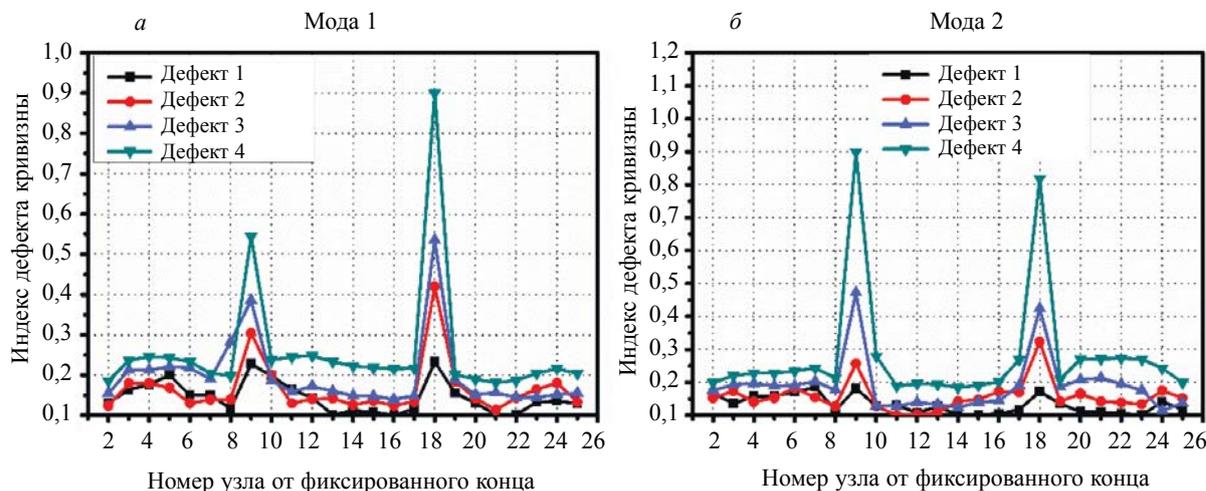


Рис. 15. Индекс дефекта кривизны на основе данных численных расчетов: индекс дефекта кривизны для моды 1 (а); индекс дефекта кривизны для моды 2 (б).

#### 4.6. Анализ дефектов в балке с применением результатов, полученных искусственной нейронной сетью

Измеренные данные частотной характеристики (АЧХ) обрабатываются в программе MATLAB с помощью метода `trainlm`, который по своей эффективности превосходит другие методы, включая `trainbfg`, `trainlm`, `trainscg`, `trainrp`, `traingda` и `traingdx`, как показано в [35]. В функции обучения сети `Trainlm` [36] используется подход оптимизации Левенберга—Марквардта. `Trainlm` использует оптимизацию Левенберга—Марквардта для обновления весовых переменных и переменных смещения. Данные должны быть масштабированы в едином диапазоне (0,1—0,9) [38], чтобы предотвратить преобладание больших целых чисел над меньшими. Данные должны быть стандартизованы в пределах слегка смещенных значений, например, 0,1—0,9, а не 0—1, чтобы избежать насыщения сигмоидной функции, что приводит к медленному обучению или его отсутствию.

В данной сети используется три набора входных данных и один набор выходных данных. Для каждого набора данных получено в общей сложности 130 единиц, из которых 90 используются для обучения, а 20—20 образцов из всей выборки данных берутся для валидации и тестирования. В качестве входных данных берутся место удара, глубина дефекта и процент от общей глубины повреждений, а в качестве выходных данных — измеренные наборы данных АЧХ. Для обучения сети используются 2—25 нейронов, как показано в [35]. Оптимальные результаты показаны в табл. 4 и 5. Сеть, которая обучалась на наборах данных, полученных при измерениях на профильной балке, может быть представлена в виде такой топологии (3 – 12 – 1) и (3 – 10 – 1) для моды 1 и моды 2. Топология сети (3 – 12 – 1) и (3 – 10 – 1) показывает количество входов, нейронов и выходов соответственно. Поскольку истинные цели не могут быть достигнуты без устранения экспериментальных недостатков из наборов данных, экспериментальная ошибка уменьшается путем обработки наборов данных АЧХ с помощью ИНС. Полученные нейросетью наборы данных, которые были признаны способными для нахождения местоположения дефектов, были успешно использованы для построения измененных форм мод, представленных на рис. 16.

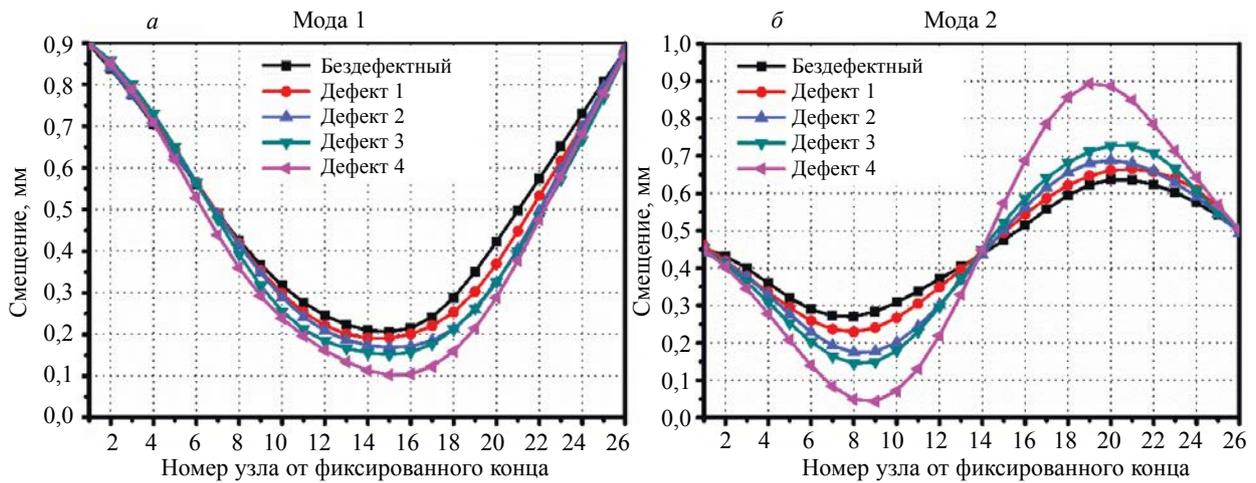


Рис. 16. Формы поперечных мод, построенные с помощью ИНС на основе экспериментально полученных данных: 1-я мода (а); 2-я мода (б).

Для исследования состояния конструкции были выбраны две первичные экспериментальные тренированные формы мод, как показано на рис. 16. На основании спрогнозированных нейросетью выходных наборов данных рассчитывается кривизна формы моды, а затем определяется индекс дефекта кривизны для оценки расположения дефекта. В процессе обучения нейронной сети используется различное количество нейронов, от двух до двадцати. В табл. 4 и 5 представлены результаты обучения. Полученные результаты демонстрируют, что коэффициент регрессии, СКО и САО были корректно рассчитаны на нейронах в количестве 12 и 10 для моды 1 и моды 2

Таблица 4

Результаты, полученные для моды 1 с использованием алгоритма Trainlm для экспериментальных данных

Количество нейронов	Структура сети	Коэффициент регрессии $R$				СКО	% САО
		Обучение	Валидация	Тестирование	Общий		
$n = 2$	3 – 2 – 1	0,997058	0,996910	0,997182	0,997123	0,0003585	0,24552
$n = 4$	3 – 4 – 1	0,998891	0,998346	0,997748	0,998746	0,0001563	0,491229
$n = 6$	3 – 6 – 1	0,999191	0,998677	0,999514	0,999155	0,00001055	0,22519
$n = 8$	3 – 8 – 1	0,999321	0,999259	0,999286	0,999311	0,00008644	0,187576
$n = 10$	3 – 10 – 1	0,999578	0,999444	0,998586	0,999374	0,00006324	0,159408
<b><math>n = 12</math></b>	<b>3 – 12 – 1</b>	<b>0,999560</b>	<b>0,999040</b>	<b>0,999469</b>	<b>0,999438</b>	<b>0,00007062</b>	<b>0,159122</b>
$n = 14$	3 – 14 – 1	0,999194	0,999171	0,999499	0,999225	0,00010048	0,88094
$n = 16$	3 – 16 – 1	0,999477	0,999581	0,998828	0,999330	0,00008640	0,396848
$n = 18$	3 – 18 – 1	0,999605	0,999124	0,999049	0,999421	0,00007331	0,51149
$n = 20$	3 – 20 – 1	0,999558	0,999218	0,999110	0,999385	0,00007810	0,59836

соответственно. Для выявления локализации дефекта в модели балки также был проведен анализ МКЭ. Измеряемые в конечно-элементной модели модальные параметры не требуют обучения ИНС. Модальные параметры используются для расчета индекса дефекта кривизны. Как следствие, индекс дефекта кривизны используется для расчета положения дефекта в модели балки. Для обоих мод данные для обучения указывают на местоположение дефекта путем обучения на разных нейронах.

Таблица 5

Результаты, полученные для моды 2 с использованием алгоритма Trainlm для численных данных

Количество нейронов	Структура сети	Коэффициент регрессии $\mathbb{R}$				СКО	% САО
		Обучение	Валидация	Тестирование	Общий		
$n = 2$	3 – 2 – 1	0,951895	0,945248	0,971328	0,953763	0,003397	0,707141
$n = 4$	3 – 4 – 1	0,994467	0,994286	0,995418	0,993966	0,0004667	2,00922
$n = 6$	3 – 6 – 1	0,998217	0,992337	0,997576	0,997094	0,0006003	0,5587
$n = 8$	3 – 8 – 1	0,997852	0,995516	0,997633	0,997236	0,0002080	0,77982
<b><math>n = 10</math></b>	<b>3 – 10 – 1</b>	<b>0,999510</b>	<b>0,998706</b>	<b>0,998194</b>	<b>0,998800</b>	<b>0,0001965</b>	<b>0,35441</b>
$n = 12$	3 – 12 – 1	0,997112	0,992386	0,993363	0,995999	0,0003006	0,39918
$n = 14$	3 – 14 – 1	0,998920	0,999147	0,998400	0,998658	0,0002024	1,66571
$n = 16$	3 – 16 – 1	0,998504	0,998890	0,993144	0,998024	0,0002499	1,12825
$n = 18$	3 – 18 – 1	0,997283	0,998465	0,994314	0,996900	0,0002579	2,39681
$n = 20$	3 – 20 – 1	0,997170	0,995316	0,996060	0,996796	0,0002446	1,17172

#### 4.7. Применение измененного индекса дефекта кривизны для обнаружения дефектов

Перспективный метод контроля дефектов в численной модели балки был предложен на основе использования производной второго порядка от формы моды [9]. Квадрат кривизны формы моды и больший индекс кривизны были признаны эффективными для выявления расположения дефекта в [28, 22]. Цель использования абсолютного индекса дефекта кривизны с обучением и без обучения ИНС представлена в данном исследовании для идентификации расположения дефекта путем использования форм мод смещения конструкции. В данной работе была использована новая методика для уменьшения погрешности экспериментальных данных АЧХ с помощью обучения ИНС, что является важным для последующей оценки повреждений конструкции. Было установлено, что индекс дефекта кривизны, рассчитанный непосредственно по данным АЧХ, не способен выявить расположение дефекта.

С другой стороны, формы криволинейных мод, вычисленные на основе обученных данных АЧХ, могут успешно отслеживать существование и местоположение дефекта конструкции. Для проверки устойчивости методики и подтверждения экспериментальных результатов проводится численное исследование. Внешние помехи в полученных результатах не являются исключением в

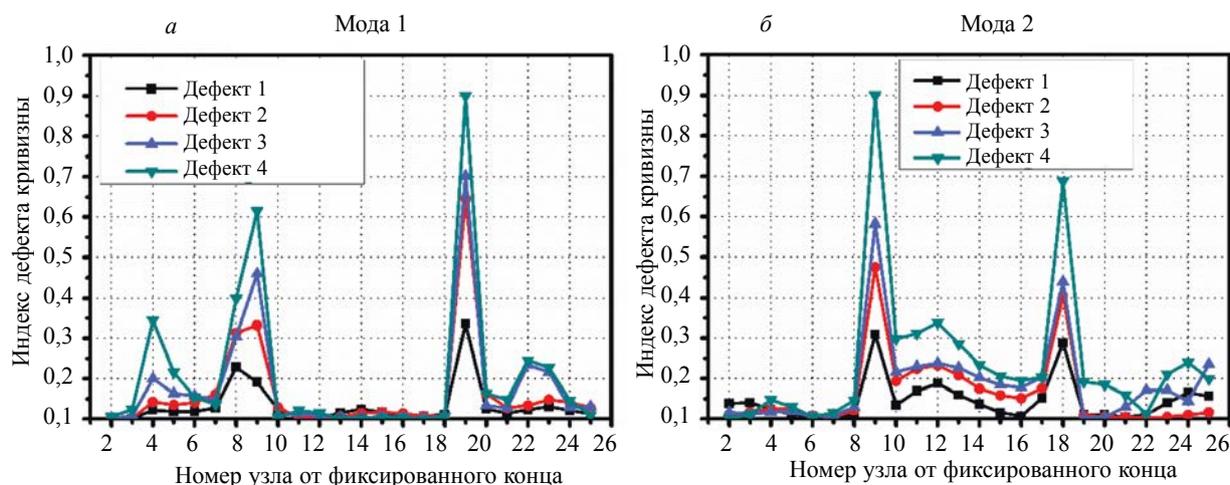


Рис. 17. Измененный индекс дефекта кривизны при использовании экспериментальных данных, полученных с помощью ИНС: индекс дефекта кривизны для моды 1 (а); индекс дефекта кривизны для моды 2 (б).

численном анализе. В результате полученные данные должны быть точными, а конкретная область дефекта должна быть успешно идентифицирована.

Результаты, показанные на рис. 17, отражают более точные значения, чем те, которые показаны на рис. 13. Индекс дефекта кривизны изменяется путем обучения модальных параметров, чтобы уменьшить наличие ошибок. На рис. 17 результаты были существенно улучшены, а повреждения локализованы вблизи места надреза.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основная проблематика текущего исследования сосредоточена на обеспечении целостности конструкций и обнаружении повреждений существующих сооружений. Когда требуется обеспечить целостность конструкций в сфере сохранности гражданской инфраструктуры, обнаружение многочисленных повреждений остается более сложной задачей, чем выявление единичного дефекта. Благодаря многочисленным инженерным приложениям такого рода конструкции являются весьма значимыми. Одним из важных видов конструкций, рассматриваемых при исследовании повреждений, является модель консольной балки с опорой. Исследование включает в себя множество этапов анализа для получения окончательных результатов.

Модальные параметры извлекаются для экспериментальной и численной модели балки с целью выявления форм смещенных мод от различных глубинных надрезов в различных областях балки.

В экспериментальных модальных данных неизбежно наличие ошибок из-за внешних помех. Наличие непредотвратимых ошибок может снизить достоверность выводов и результатов.

При численном моделировании выходных модальных параметров ошибки и внешние помехи не влияют на результаты, а точное расположение и критичность дефектов определяются для различных дефектов в различных областях.

Результаты с использованием экспериментально полученных исходных данных демонстрируют многочисленные пики, которые неверно указывают на локализацию дефекта в модели балки.

ИНС применяется для уменьшения наличия ошибок в модальных параметрах, что значительно улучшает их качество.

Полученные после обучения ИНС модальные параметры используются для расчета кривизны формы моды и одновременно с этим для расчета индекса дефекта кривизны, чтобы точно идентифицировать расположение дефекта в нескольких местах.

Применяемая стратегия имеет большее значение из-за простоты применения при идентификации дефектов для экспериментально и численно полученных результатов.

Для проверки надежности метода проводится сравнение между экспериментально и аналитически полученным показателем дефекта кривизны.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Wahab M.A., De Roeck G.* Damage detection in bridges using modal curvatures: application to a real damage scenario // *J. Sound. Vib.* 1999. V. 226 (2). P. 217—235. <https://doi.org/10.1006/jsvi.1999.2295>
2. *Owolabi G. M., Swamidass A.S.J., Seshadri R.* Crack detection in beams using changes in frequencies and amplitudes of frequency response functions // *J. Sound. Vib.* 2003. V. 265. No. 1. P. 1—22. [https://doi.org/10.1016/S0022-460X\(02\)01264-6](https://doi.org/10.1016/S0022-460X(02)01264-6)
3. *Sinou Jean-Jacques.* Damage assessment based on the frequencies' ratio surfaces intersection method for the identification of the crack depth, location and orientation // *Structural Durability and Health Monitoring.* 2007. V. 3. No. 3. P. 134—162.
4. *Altunışık Ahmet Can, Okur Fatih Yesevi, Kahya Volkan.* Structural identification of a cantilever beam with multiple cracks: Modeling and validation // *International Journal of Mechanical Sciences.* 2017. V. 130. P. 74—89. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2017.05.039>
5. *Yazdekhastı Sepideh, Piratla Kalyan R., Atamturktur Sez, Khan Abdul.* Experimental evaluation of a vibration-based leak detection technique for water pipelines // *Structure and Infrastructure Engineering.* 2018. V. 14. No. 1. P. 46—55. <https://doi.org/10.1080/15732479.2017.1327544>
6. *Altunışık Ahmet Can, Okur Fatih Yesevi, Karaca Sebahat, Kahya Volkan.* Vibration-based damage detection in beam structures with multiple cracks: modal curvature vs. modal flexibility methods // *Nondestructive Testing and Evaluation.* 2019. V. 34. No. 1. P. 33—53. <https://doi.org/10.1080/10589759.2018.1518445>
7. *Roy Koushik.* Structural damage identification using mode shape slope and curvature // *Journal of Engineering Mechanics.* 2017. V. 143. No. 9. P. 04017110. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0001305](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0001305)
8. *Feng Dongming, Feng Maria Q.* Output-only damage detection using vehicle-induced displacement

- response and mode shape curvature index // *Structural Control and Health Monitoring*. 2016. V. 23. No. 8. P. 1088—1107. <https://doi.org/10.1002/stc.1829>
9. *Pandey A.K., Biswas M., Samman M.M.* Damage detection from changes in curvature mode shapes // *J. of sound and vibration*. 1991. V. 145. No. 2. P. 321—332. [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(91\)90595-B](https://doi.org/10.1016/0022-460X(91)90595-B)
10. *Brigham E.O.* *The Fast Fourier Transform and Applications*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1988.
11. *Zenzen R., Khatir Samir, Belaidi I., Wahab Magd Abdel.* Structural health monitoring of beam-like and truss structures using frequency response and particle swarm optimization // *Numerical Modelling in Engineering*. Springer, Singapore, 2018. P. 390—399. DOI: 10.1007\_978-981-13-2273-0\_30
12. *Worden Keith, Charles R. Farrar, Jonathan Haywood, Michael Todd.* A review of nonlinear dynamics applications to structural health monitoring. *Structural Control and Health Monitoring // The Official Journal of the International Association for Structural Control and Monitoring and the European Association for the Control of Structures*. 2008. V. 15. No. 4. P. 540—567. <https://doi.org/10.1002/stc.215>
13. *de la Cruz Rafael, Salehi Paniagua V.K., Salgado Sánchez P., García-Fogeda P.* A Vibration-Based Method for assessing the integrity of welded structures // *Nondestructive Testing and Evaluation*. 2020. V. 35. No. 4. P. 452—472. <https://doi.org/10.1080/10589759.2019.1692011>
14. *Pooya Seyed Majid Hosseini, Massumi Ali.* A novel and efficient method for damage detection in beam-like structures solely based on damaged structure data and using mode shape curvature estimation // *Applied Mathematical Modelling*. 2021. V. 91. P. 670—694. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2020.09.012>
15. *Sha Ganggang, Radzieński Maciej, Cao Maosen, Ostachowicz Wiesław.* A novel method for single and multiple damage detection in beams using relative natural frequency changes // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2019. V. 132. P. 335—352. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2019.06.027>
16. *Gorgin Rahim.* Damage identification technique based on mode shape analysis of beam structures // *Structures*. Elsevier, 2020. V. 27. P. 2300—2308. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.08.034>
17. *Hooman Nick, Armin Aziminejad.* Vibration-Based Damage Identification in Steel Girder Bridges Using Artificial Neural Network Under Noisy Conditions // *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2021. V. 40. No. 1. P. 1—22. <https://doi.org/10.1007/s10921-020-00744-8>
18. *Hamey Cole S., Wahyu Lestari, Pizhong Qiao, Gangbing Song.* Experimental damage identification of carbon/epoxy composite beams using curvature mode shapes // *Structural Health Monitoring*. 2004. V. 3. No. 4. P. 333—353. <https://doi.org/10.1177/1475921704047502>
19. *Kumar Anjneya, Koushik Roy.* Response surface-based structural damage identification using dynamic responses // *Structures*. Elsevier. 2021. V. 29. P. 1047—1058. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.11.033>
20. *Gupta Krishanu, Bhattacharjee Biplab, Gupta Sonu Kumar, Chakraborti Prasun.* Study of natural frequencies of natural rubber cored novel sandwich structure without tip mass // *Structures*. Elsevier, 2020. V. 28. P. 651—658. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.09.010>
21. *Stoykov S., Manoach E.* Damage localization of beams based on measured forced responses // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2021. V. 151. P. 107379. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.107379>
22. *Qiao Pizhong, Lu Kan, Lestari Wahyu, Wang Jialai.* Curvature mode shape-based damage detection in composite laminated plates // *Composite Structures*. 2007. V. 80. No. 3. P. 409—428. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2006.05.026>
23. *Sarehati Umar, Norhisham Bakhary, Abidin A.R.Z.* Response surface methodology for damage detection using frequency and mode shape // *Measurement*. 2018. V. 115. P. 258—268. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.10.047>
24. *Gupta S.K., Das S.* Damage detection in a cantilever beam using noisy mode shapes with an application of artificial neural network-based improved mode shape curvature technique // *Asian. J. Civ. Eng.* 2021. <https://doi.org/10.1007/s42107-021-00404-w>
25. *Gupta S.K., Das S.* Multiple Damage Identification in a Beam Using Artificial Neural Network-Based Modified Mode Shape Curvature // *Arab. J. Sci. Eng.* 2021. <https://doi.org/10.1007/s13369-021-06267-2>
26. *Cawley Peter, Adams Robert Darius.* The location of defects in structures from measurements of natural frequencies // *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*. 1979. V. 14. No. 2. P. 49—57. <https://doi.org/10.1243/03093247V142049>
27. *Hassiotis Sophia, Jeong Garrett D.* Identification of stiffness reductions using natural frequencies // *J. Eng. Mech.* 1995. V. 121. No. 10. P. 1106—1113. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1995\)121:10\(1106\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1995)121:10(1106))
28. *Rucevskis S., Wesolowski Miroslaw.* Identification of damage in a beam structure by using mode shape curvature squares // *Shock and Vibration*. 2010. V. 17. No. 4—5. P. 601—610. <https://doi.org/10.3233/SAV-2010-0551>
29. *Bishop Christopher M.* *Neural networks for pattern recognition*. Oxford university press, 1995.
30. *Bakhary Norhisham, Hong Hao, Deeks Andrew J.* Structure damage detection using a neural network with multi-stage substructuring // *Advances in Structural Engineering*. 2010. V. 13. No. 1. P. 95—110. <https://doi.org/10.1260/1369-4332.13.1.95>
31. *Padil Khairul H., Bakhary Norhisham, Abdulkareem Muyideen, Li Jun, Hao Hong.* Non-probabilistic method to consider uncertainties in frequency response function for vibration-based damage detection using Artificial Neural Network // *Journal of Sound and Vibration*. 2020. V. 467. P. 115069. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2019.115069>

32. *Hakim S.J.S., Razak H. Abdul, Ravanfar S.A.* Fault diagnosis on beam-like structures from modal parameters using artificial neural networks // *Measurement*. 2015. V. 76. P. 45—61. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.08.021>
33. *Ismail Harun Mohamed, Ng Hoon Kiat, Queck Cheen Wei, Gan Suyin.* Artificial neural networks modelling of engine-out responses for a light-duty diesel engine fuelled with biodiesel blends // *Applied energy*. 2012. V. 92. P. 769—777. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.08.027>
34. *Yusaf Talal F., Buttsworth D. R., Saleh Khalid H., Yousif B.F.* CNG-diesel engine performance and exhaust emission analysis with the aid of artificial neural network // *Applied Energy*. 2010. V. 87. No. 5. P. 1661—1669. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.10.009>
35. *Bhowmik Subrata, Rajsekhar Panua, Durbadal Debroy, Abhishek Paul.* Artificial neural network prediction of diesel engine performance and emission fueled with Diesel—Kerosene—Ethanol Blends: A fuzzy-based optimization // *Journal of Energy Resources Technology*. 2017. V. 139. No. 4. <https://doi.org/10.1115/1.4035886>
36. *Lubna Badri.* Development of neural networks for noise reduction // *Int. Arab J. Inf. Technol.* 2010. V. 7. No. 3. P. 289—294.
37. *Limongelli M.P.* Frequency response function interpolation for damage detection under changing environment // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2010. V. 24. No. 8. P. 2898—2913.
38. *Hassoun Mohamad H.* Fundamentals of artificial neural networks. MIT press, 1995.
39. *Young Dana, Felgar Robert P.* Tables of characteristic functions representing normal modes of vibration of a beam. 1949.
-

## ВОЗМОЖНОСТИ РУЧНОГО ВИХРЕТОКОВОГО КОНТРОЛЯ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ГЛУБИНЫ КОНТАКТНО-УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН ПОВЕРХНОСТИ КАТАНИЯ РЕЛЬСОВ

© 2023 г. С.П. Шляхтенков<sup>1,\*</sup>, Д.Б. Некрасов<sup>2,\*\*</sup>, С.В. Палагин<sup>2</sup>, О.В. Бессонова<sup>3</sup>,  
А.А. Попков<sup>1</sup>, С.А. Бехер<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Сибирский государственный университет путей сообщения, Россия 630049 Новосибирск,  
ул. Дуси Ковальчук, 191

<sup>2</sup>ООО «ЕВРАЗ», Россия 121353 Москва, ул. Беловежская, 4

<sup>3</sup>АО «ЕВРАЗ ЗСМК», Россия 654042 Новокузнецк, Космическое шоссе, 16

E-mail: \*shlyakhtenkow@gmail.com; \*\*dmitry.nekrasov@evraz.com

Поступила в редакцию 14.02.2023; после доработки 13.03.2023

Принять к публикации 17.03.2023

Исследована возможность применения вихретокового метода для оценки глубины трещин поверхности катания рельсов в эксплуатации при планировании и приемке работ рельсошлифовального поезда. Выполнены экспериментальные исследования влияния частоты возбуждения и угла наклона вихретокового преобразователя, состояния поверхности, глубины и угла наклона поверхностной трещины на амплитуду и фазу вихретокового сигнала. Определены возможности амплитудно-фазового способа отстройки от мешающих факторов, связанных с наклоном преобразователя и кривизной контролируемой поверхности. Исследована разрешающая способность дефектоскопа при оценке характеристик двух и более близко расположенных трещин — дефект типа «сетка» трещин. Глубина поверхностных трещин в диапазоне от 0,1 до 1,4 мм определялась металлографическим исследованием после проведения вихретокового контроля. Экспериментально обоснованы оптимальные параметры контроля и установлена корреляционная связь глубины трещины и проекции амплитуды сигнала на направление, перпендикулярное направлению изменения мешающего фактора — угла наклона преобразователя.

*Ключевые слова:* контроль вихретоковый, поверхность катания рельса, контактно-усталостные трещины, металлография, глубина трещины, способ отстройки от мешающего фактора.

DOI: 10.31857/S0130308223040036, EDN: YNPZUU

### ВВЕДЕНИЕ

Вертикальные динамические силы от подвижного состава, продольные силы тяги и торможения, поперечные силы, возникающие при движении в кривых, создают в месте контакта колеса и рельса значительные локальные механические напряжения [1—3], превышающие предел текучести рельсовой стали. Развитие пластической деформации формирует наклепанный слой, структура и механические характеристики которого существенно отличаются от основного материала рельса [4—6]. Несмотря на повышение твердости поверхностного слоя и, соответственно, сопротивляемости износу, снижение пластичности стали увеличивает скорость развития усталостных трещин [7—10].

С целью предотвращения дальнейшего роста трещин и выхода их из наклепанного слоя в основной металл головки рельса проводится профилактическая шлифовка [11] поверхности катания на глубину не менее 0,1 мм. В инструкции по шлифовке и фрезерованию рельсов в пути в стационарных условиях, утвержденной Распоряжением ОАО «РЖД» 29.12.2014 г. № 3205р, установлено требование к толщине снимаемого слоя, которая должна превышать глубину контактно-усталостного повреждения на 0,5 мм. На железных дорогах РФ средства измерения глубины поверхностных трещин в эксплуатации до сих пор не применяются, толщина снимаемого материала определяется нормативными документами с учетом радиусов кривых участков пути и периодичности шлифовки.

В этих условиях создание методики измерения глубины поверхностных трещин является актуальной задачей, направленной на повышение эффективности применения технологии шлифовки рельса [12, 13] за счет снижения затрат на необоснованное рельсошлифование более необходимого и устранение последствий развития не полностью удаленных дефектов.

Для определения глубины поверхностных трещин в эксплуатации наиболее перспективным является вихретоковый контроль (ВТК) [14, 15]. Метод основан на регистрации параметров вихревых токов, возбуждаемых в объекте контроля первичным переменным магнитным полем. Основными преимуществами ВТК являются: бесконтактность, многопараметровость и возмож-

ность управления чувствительностью контроля по глубине поверхностного слоя подбором оптимальной частоты переменного тока в возбуждающей обмотке вихретокового преобразователя (ВТП) [16, 17].

Целью работы является определение возможностей ручного вихретокового контроля для измерения глубины контактно-усталостных трещин на поверхности катания рельсов с оценкой показателей точности и степени влияния на результаты измерений мешающих факторов.

### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальные исследования проводили на вырезанных из действующего пути фрагментах рельса типа Р65, категории ДТ350, стали марки Э76ХФ с реальными дефектами поверхности катания. На испытания отбирали образцы с дефектами нескольких типов: одиночные трещины, сетка трещин на рабочей грани и в середине поверхности катания, ориентированные вдоль, перпендикулярно и под углом к продольной оси рельса. ВТК образцов выполняли на частотах в диапазоне от 100 до 400 кГц дефектоскопом Вектор-60Д, зарегистрированном в Государственном реестре средств измерений под № 33845-12, в комплекте со стандартным ВТП ПВР-1. Преобразователь относится к параметрическим однокатушечным резонансным датчикам карандашного типа с диаметром ферромагнитного сердечника 1 мм. Выбор ВТП обусловлен достаточно широкой рабочей полосой частот с верхней границей 1 МГц и локальностью контроля, связанной с наличием ферромагнитного сердечника. Это обеспечивает возможность обнаружения и оценки параметров трещин глубиной от 0,1 мм при расстоянии между ними более 1 мм.

Для отстройки от мешающих факторов использовали амплитудно-фазовый способ [18]. Главной измеряемой характеристикой является проекция сигнала ВТП на ось, перпендикулярную направлению изменения сигнала под влиянием мешающего фактора, вызванного наклоном ВТП относительно нормали поверхности сканирования (рис. 1). Негативный эффект — уменьшение амплитуды полезного сигнала при этом компенсируется достаточно эффективным снижением неопределенности сигнала.

Выбор частоты возбуждения ВТП является основополагающим в технологии оценки глубины трещины, от частоты напрямую зависит диапазон показаний и погрешность метода. Один из основных критериев выбора частоты связан с необходимостью обеспечить максимальную чувствительность сигнала к глубине трещин от 0,1 до 0,5 мм [19]. На низких частотах вихревой ток проникает на большую глубину (толщина скин-слоя), что сопровождается увеличением диапазона измерения, при этом негативный эффект выражается в уменьшении чувствительности к дефектам малых, по сравнению со скин-слоем, размеров.



Рис. 1. Сигнал ВТП на фазовой плоскости при сканировании образца с одиночной трещиной и линия отстройки от мешающего фактора.

В предварительных экспериментах исследовали влияние частоты возбуждения вихревых токов на амплитуду полезного сигнала от трещины. В диапазоне частот (100—400) кГц с шагом в 100 кГц амплитуда сигнала монотонно возрастает при увеличении частоты в 4 раза. При этом регистрируемые сигналы находятся в диапазоне измерения, а уменьшение амплитуды на низких частотах может быть компенсировано увеличением усиления дефектоскопа, что позволяет выбрать для контроля произвольную частоту исследуемого диапазона.

Важным параметром дефектотрии сетки трещин является разрешающая способность аппаратуры, минимальное расстояние между дефектами, которые при контроле фиксируются отдельно. На частотах возбуждения вихревых токов от 100 до 400 кГц проведено сканирование фрагмента рельса с трещиной. Установлено, что на всех исследованных частотах сердечник ВТП обеспечивает уменьшение амплитуды сигнала на 50 % при смещении центра ВТП от центра трещины на расстояние 1 мм. Это позволяет независимо от частоты ВТП уверенно фиксировать сигналы от нескольких трещин, расстояние между которыми превышает 1 мм.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На фрагментах рельсов, изъятых из эксплуатации, после травления в 50 %-растворе соляной кислоты выявляются тонкие единичные и групповые («сетка трещин») эксплуатационные контактно-усталостные трещины (рис. 2—7). Обнаруженные трещины контролировали вихретоковым методом, затем образцы с трещинами подвергали разрушающему контролю: разрезали по линии сканирования и параллельно ей на расстоянии 1 мм слева и справа и изготавливали металлографические шлифы. Оптическим микроскопом с увеличением  $\times 100$  и  $\times 200$  для каждой трещины в трех сечениях измеряли: глубину, ширину раскрытия на поверхности и угол наклона относительно нормали к поверхности катания. Всего в 6 образцах идентифицировано 69 дефектов (табл. 1).

Таблица 1

Характеристики исследуемых образцов

№ образца	План пути, радиус	Пропущенный тоннаж, млн т брутто	Исследуемое сечение	Характеристики трещин			
				Количество	Диапазон глубин, мм	Место расположения	Угол на плоскости поверхности катания*, °
1	Кривая 300 м	320	Продольное	8	0,12—0,42	Рабочая грань	50
2	Прямая	1400	Продольное	5	0,25—0,35		60
3	Прямая	340	Продольное	18	0,61—1,73		35—40
4	Кривая 1150 м	270	Продольное	16	0,14—0,44	Центр поверхности катания	85—90
5	Кривая 650 м	180	Поперечное	9	0,20—0,76		0—10
6	Кривая 1000 м	150	Продольное	8	0,38—0,68		65
			Поперечное	5	0,67—0,92	0—15	

\*Угол на плоскости поверхности катания определялся относительно продольной оси рельса.

В образцах № 1, № 2, № 3 (см. рис. 2—4) трещины распространяются от рабочей выкружки поверхности катания рельса. Образцы № 2 и № 3 вырезаны из прямых участков пути с пропущенным тоннажем 1400 и 340 млн т брутто соответственно. Образец № 1 вырезан из рельса, расположенного в кривом участке пути с пропущенным тоннажем 320 млн т брутто. Трещины имеют глубину от 0,12 до 1,73 мм и ориентированы под наклоном относительно нормали поверхности катания (30—40)°. Для сканирования выбирали линию, на которой расстояние между трещинами составляет более 1 мм, что позволяет уверенно фиксировать сигналы ВТП. Сканирование этих образцов проводили вдоль рельса независимо от угла трещины в плоскости поверхности катания.

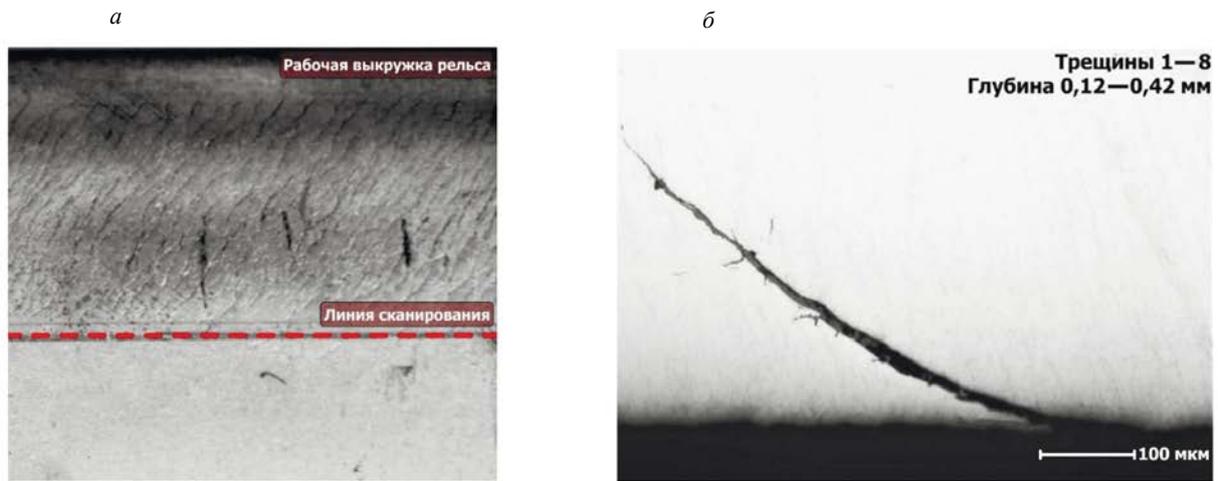


Рис. 2. Образец № 1 (а) с фотографией шлифа характерной трещины (б).

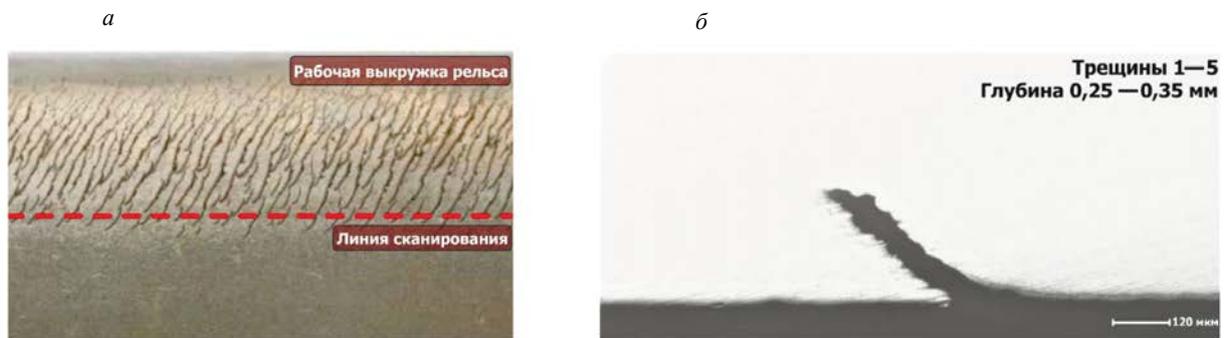


Рис. 3. Образец № 2 (а) с фотографией шлифа характерной трещины (б).

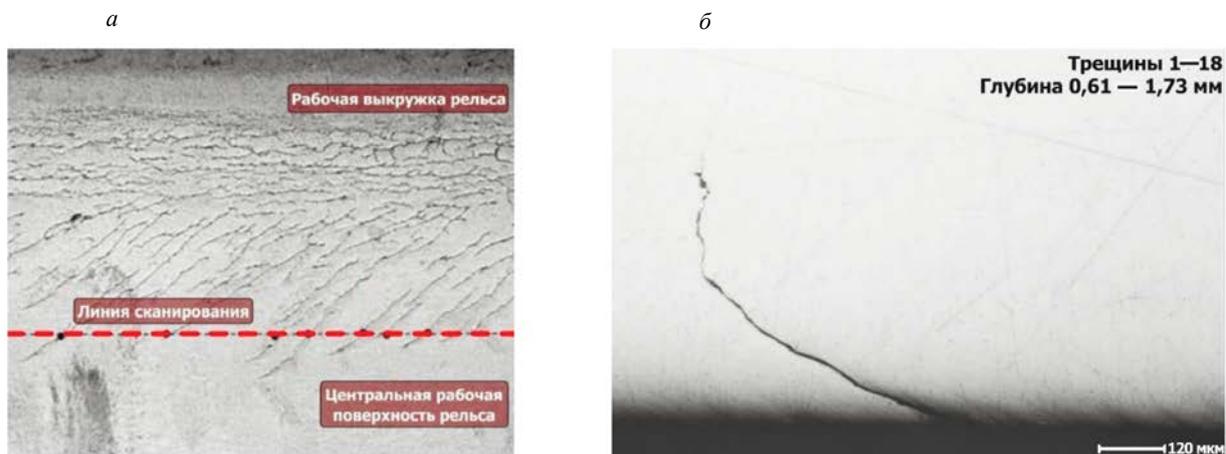


Рис. 4. Образец № 3 (а) с фотографией шлифа характерной трещины (б).

Трещины в средней части поверхности катания исследовали в образцах № 4, № 5, № 6 (рис. 4—6). Образцы вырезаны из кривых участков пути с пропущенным тоннажем от 150 до 270 млн т брутто и содержат трещины глубиной от 0,14 до 0,92 мм. Трещины в основном распро-

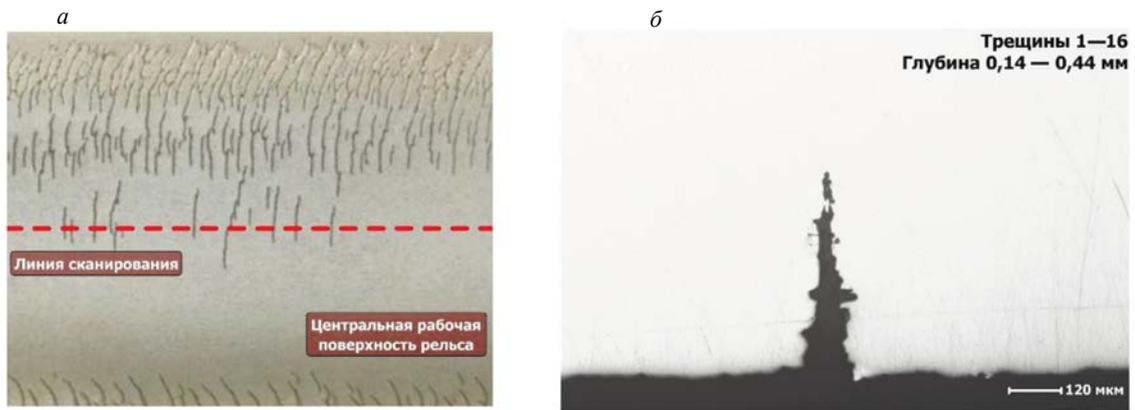


Рис. 5. Образец № 4 (а) с фотографией шлифа характерной трещины (б).

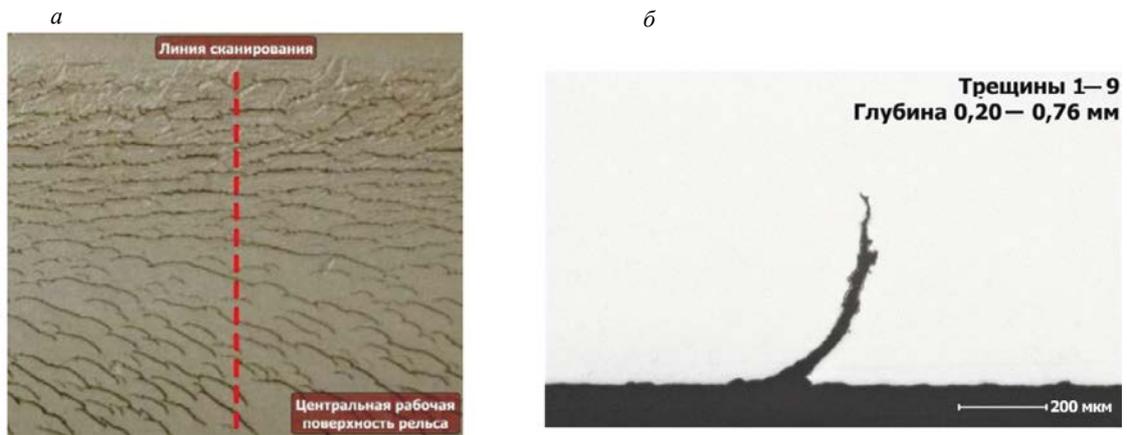


Рис. 6. Образец № 5 (а) с фотографией шлифа характерной трещины (б).

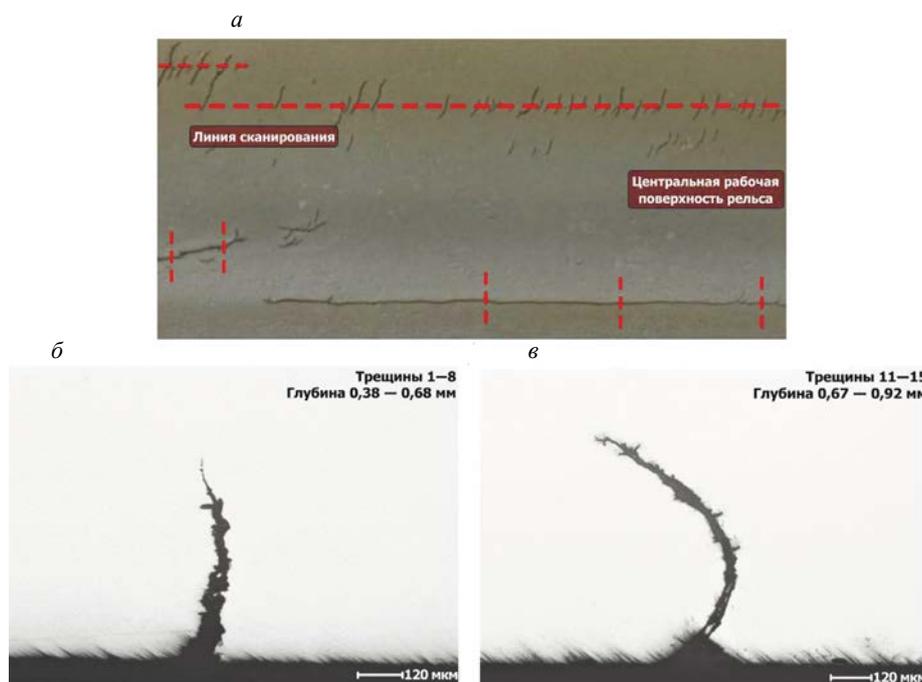


Рис. 7. Образец № 6 (а) с фотографиями шлифов характерных трещин (б, в).

страняются вглубь металла, перпендикулярно поверхности, некоторые имеют изгиб (рис. 6, 7). Сканирование ВТП проводилось как в продольном к оси рельса, так и в поперечном направлениях, в зависимости от преимущественной ориентации дефектов.

Для определения связи амплитуды сигнала с глубиной трещины на частотах 100 и 400 кГц проведено сканирование образцов вдоль траектории, обозначенной штриховой линией на рис. 2—7. В процессе контроля фиксировалась временная развертка проекции сигнала, определялись максимальные амплитуды сигнала ВТП и соответствующие им фазы (рис. 8).

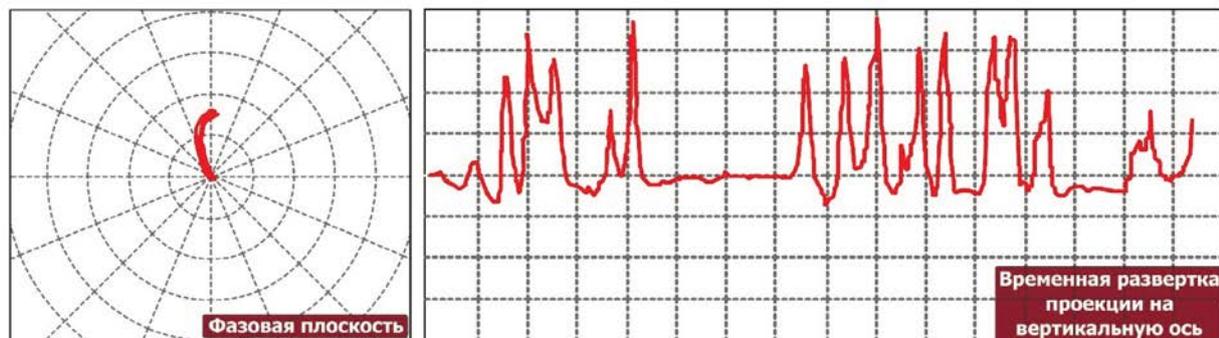


Рис. 8. Пример развертки на фазовой плоскости и временная развертка сигналов ВТП при сканировании образца 4.

## АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

На основе полученных данных построена зависимость проекции амплитуды сигнала дефектоскопа от глубины трещины (рис. 9). Амплитуда пересчитана к единичному коэффициенту усиления. Наибольший коэффициент корреляции наблюдается на частоте возбуждения преобразователя 100 кГц и по всем трещинам во всех образцах составляет 0,84. Для данных, полученных для образцов с глубиной трещин до 1 мм, коэффициент корреляции изменяется в диапазоне от 0,72 до 0,97.

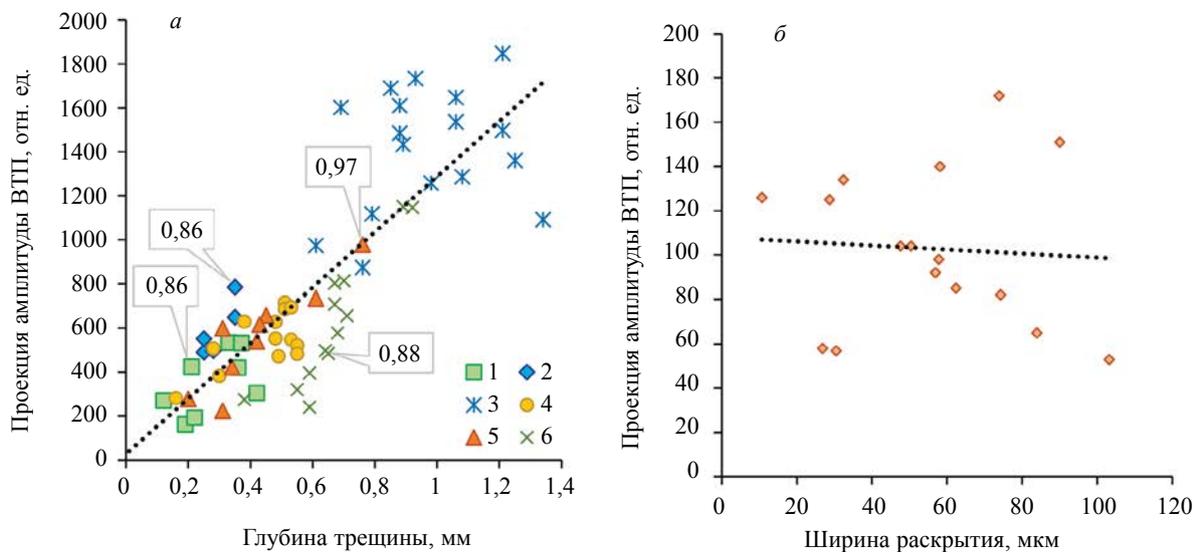


Рис. 9. Проекция амплитуды ВТП от трещин с разной глубиной (а) и шириной раскрытия (б) на частоте 100 кГц.

На частоте 400 кГц установлено меньшее, по сравнению с частотой 100 кГц, значение коэффициента корреляции амплитуды сигнала ВТП с глубиной трещины, которое не превышает 0,66. Этот эффект связан с меньшей в два раза глубиной проникновения вихревых токов и повышением чувствительности к углу наклона преобразователя на высокой частоте. Толщина скин-слоя, рассчитанная по формуле (1) для относительной магнитной проницаемости  $\mu = 66$  и удельной проводимости  $\sigma = 7,7$  МСм/м, составляет 0,07 мм для частоты 100 кГц и 0,035 мм для 400 кГц:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \mu_0 \cdot \sigma}}. \quad (1)$$

Выполнена проверка влияния ширины раскрытия дефекта на сигнал ВТП (рис. 9б) для двух образцов в диапазоне раскрытий от 10 до 110 мкм. Рассчитанный коэффициент корреляции параметров регистрируемых сигналов ВТП с шириной раскрытия по абсолютному значению меньше 0,01.

Зависимость амплитуды сигнала  $A$ , выраженной в относительных единицах, от глубины трещины (см. рис. 9) на частоте 100 кГц аппроксимировали методом наименьших квадратов линейной зависимостью:

$$A = a \cdot h + b, \quad (2)$$

где  $h$  — глубина трещины, мм;  $a = 1171$  мм<sup>-1</sup> — коэффициент пропорциональности;  $b = 72$  — коэффициент смещения.

Средние квадратические отклонения коэффициентов пропорциональности и смещения  $\sigma_a = 97$  мм<sup>-1</sup> и  $\sigma_b = 62$  определяли по известным формулам математической статистики [20]:

$$\sigma_a = \sqrt{\frac{\sum (A - a \cdot h_i - b)^2}{(n-2) \cdot \sum (h_i - \bar{h})^2}}; \quad (3)$$

$$\sigma_b = \sqrt{\frac{\sum (A - a \cdot h_i - b)^2}{(n-2)} \cdot \frac{\sum h_i^2}{n \cdot \sum (h_i - \bar{h})^2}}. \quad (4)$$

Погрешности измерения глубины трещины ручным вихретоковым дефектоскопом на частоте 100 кГц в диапазоне от 0,12 до 0,9 мм содержат две составляющие: аддитивную и мультипликативную. Обе погрешности обусловлены статистической неопределенностью зависимости амплитуды сигнала от глубины трещины. Границы абсолютной аддитивной погрешности не зависят от значения измеряемой величины, а границы мультипликативной прямо пропорциональны ей. Доверительные границы погрешности, рассчитанные с учетом средних квадратических отклонений (3) и (4) с вероятностью  $P = 95$  %, составили для аддитивной составляющей  $\Delta = \pm 0,12$  мм, а для мультипликативной —  $\delta = \pm 17$  %.

Производительность рельсошлифовального поезда характеризуется толщиной снимаемого металла, которая, например, для РШП-48К составляет от 0,1 до 0,25 мм. Ручной ВТК позволяет определить глубину поверхностной трещины до 0,9 мм (при больших глубинах назначается фрезерование) с погрешностью не более 0,3 мм, что соответствует ошибке при планировании работ на 1—3 прохода рельсошлифовального поезда. Дальнейшее развитие метода вихревых токов должно быть направлено на разработку способов автоматизированного сплошного контроля рельсов в эксплуатации съемными или мобильными средствами контроля.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Вихретоковым и металлографическим методами исследованы наиболее распространенные типы контактно-усталостных дефектов поверхности катания рельсов. Конфигурация трещин головки рельсов существенно зависит от пропущенного тоннажа, условий эксплуатации и содержания пути, места расположения: в прямых участках и в кривых. Трещины ориентированы под разными углами к продольной оси рельса от 0 до 90° и с наклоном относительно вертикальной оси 0—45°. При распространении в глубину рельса наклон трещин изменяется.

В экспериментах в условиях повторяемости показано, что наибольший вклад в неопределенность измерений при ручном ВТК вносит отклонение преобразователя от вертикальной оси в процессе сканирования. Для уменьшения влияния этого фактора в качестве информативного параметра выбрана проекция амплитуды сигнала ВТП на направление, перпендикулярное направлению изменения сигнала под действием мешающего фактора.

Показана возможность отдельной оценки глубины дефектов типа «сетка» трещин при использовании ВТП с сердечником диаметром не более 1 мм. Ширина огибающей сигнала, измеренная по уровню 0,5, не превышает 1 мм.

Установлена корреляционная связь проекции амплитуды ВТП с глубиной трещины по результатам вихретокового контроля и микрофрактографии. Корреляция результатов ВТК с шириной раскрытия трещин в диапазоне от 10 до 120 мкм отсутствует, коэффициент корреляции не превышает 0,01. Показано, что на частоте 100 кГц проекция амплитуды сигнала ВТП связана с глубиной трещины в диапазоне от 0,12 до 0,9 мм с коэффициентом корреляции 0,84. С уровнем значимости 5 % погрешности измерения глубин трещин вихретоковым методом состоят из относительной 17 % и абсолютной 0,12 мм погрешностей.

Исследования выполнены с использованием мер государственной поддержки на развития кооперации российских образовательных организаций высшего образования, государственных научных учреждений и организаций реального сектора экономики, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства, предусмотренных постановлением Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218 по теме «Высокопроизводительная технология скоростного шлифования рельсов и оборудование для ее реализации на основе интеллектуальных цифровых модулей», соглашение № 075-11-2022-014 от «08» апреля 2022 г.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бехер С.А., Коломеец А.О., Степанова Л.Н., Кочетков А.С. Исследования динамических сил в системе колесо-рельс в процессе движения грузового вагона // Контроль. Диагностика. 2016. № 7. С. 68—72.
2. Степанова Л.Н., Курбатов А.Н., Тенитилов Е.С. Исследование продольных напряжений в рельсах с использованием эффекта акустоупругости на действующем участке железнодорожного пути // Контроль. Диагностика. 2019. № 2. С. 14—21.
3. Мазов Ю.Н., Локтев А.А., Сычев В.П. Оценка влияния дефектов колес подвижного состава на состояние железнодорожного пути // Вестник МГСУ. 2015. № 5. С. 61—72.
4. Степанова Л.Н., Курбатов А.Н., Кабанов С.И. Определение напряжения сжатия в рельсе с использованием эффекта акустоупругости и тензометрии // Контроль. Диагностика. 2021. Т. 24. № 7 (277). С. 14—23.
5. Муравьев В. В., Тапков С.В., Леньков С.В. Неразрушающий контроль внутренних напряжений в рельсах при изготовлении с использованием метода акустоупругости // Дефектоскопия. 2019. № 1. С. 10—16.
6. Муравьев В.В., Волкова Л.В., Платунов А.В. Исследования структурного и напряженно-деформированного состояния рельсов текущего производства методом акустоупругости // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2018. Т. 21. № 2. С. 13—23.
7. Коссов В.С., Волохов Г.М., Краснов О.Г., Овечников М.Н., Протопопов А.Л., Огуенко В.В. Влияние величины осевых нагрузок подвижного состава на контактно-усталостную долговечность рельсов // Вестник ВНИИЖТ. 2018. Т. 77. № 3. С. 149—156.
8. Величко Д.В., Севостьянов А.А., Антерейкин Е.С. Оценка надежности рельсов на участках Транссибирской магистрали // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2019. № 1 (48). С. 5—11.
9. Махутов Н.А., Коссов В.С., Оганьян Э.С., Волохов Г.М., Овечников М.Н., Протопопов А.Л. Прогнозирование контактно-усталостных повреждений рельсов расчетно-экспериментальными методами // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2020. Т. 86. № 4. С. 46—55.
10. Бондарев Э.С. Прогнозирование технического состояния рельсов по статистическим данным // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2021. № 4 (59). С. 55—61.
11. Ильиных А.С., Шаламова О.А., Юркова Е.О. Совершенствование организации работ по рельсошлифованию на основе оценки стоимости жизненного цикла рельсов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2018. № 1 (44). С. 26—32.
12. Белых В.В., Муравьев В.В., Степанов В.А. Использование информационной энтропии структуры стали для определения качества и ресурса ее функциональных свойств // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2020. Т. 23. № 3. С. 15—24.
13. Шур Е.А., Борц А.И., Сухов А.В., Абдурашитов А.Ю., Базанова Л.В., Заграничек К.Л. Эволюция повреждаемости рельсов дефектами контактной усталости // Вестник ВНИИЖТ. 2015. № 3. С. 3—9.

14. Дымкин Г.Я., Курков А.В., Смородинский Я.Г., Шевелев А.В. О чувствительности вихретокового контроля деталей железнодорожного подвижного состава // Дефектоскопия. 2019. № 8. С. 47—53.
15. *Sophian A., Tian G., Fan M.* Pulsed eddy current non-destructive testing and evaluation: A Review // *Chin. J. Mech. Eng.* 2017. V. 30. P. 500—514.
16. Жданов А.Г., Крюков А.С., Лукин В.П., Чегодаев В.В. Неразрушающий контроль поверхности головок рельсов вихретоковым методом // *Технология машиностроения.* 2015. № 6. С. 41—44.
17. *Nafiah Faris, Sophian Ali, Khan Md Raisuddin, Abidin Ilham Mukriz Zainal.* Quantitative evaluation of crack depths and angles for pulsed eddy current non-destructive testing // *NDT & E International.* 2019. V. 102. P. 180—188.
18. *Park Jeong, Lee Taek, Back In, Park Sang, Seo Jong, Choi Won, Kwon Se.* Rail surface defect detection and analysis using multi-channel eddy current method based algorithm for defect evaluation // *Nondestructive Evaluation.* 2021. V. 83
19. *Peng Xu, ChenLu Zhu, HongMing Zeng, Ping Wang.* Rail crack detection and evaluation at high speed based on differential ECT system // *Measurement.* 2020. V. 166. P. 108—152.
20. Линник Ю.В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки информации / 2-е изд., испр. и доп. М.: Физматгиз, 1962. 349 с.

## ИТЕРАЦИОННАЯ РЕКОНСТРУКЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ АЛЮМИНИЕВОГО ЛИТЬЯ С УЧЕТОМ АПРИОРНОЙ ИНФОРМАЦИИ

© 2023 г. С.А. Золотарев<sup>1,\*</sup>, А.Т. Таруат<sup>2,\*\*</sup>, Э.Г. Биленко<sup>3,\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»,  
Республика Беларусь 220072 Минск, ул. Академическая, 16  
<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет, Республика Беларусь 220013 Минск,  
пр-т Независимости, 65  
<sup>3</sup>ГНУ «Физико-Технический Институт НАН Беларуси»,  
Республика Беларусь 220141 Минск, ул. Купревича, 10  
E-mail: \*zolatarev@iaph.bas-net.by; \*\*vjgi994@gmail.com; \*\*\*bilenko@phti.by

Поступила в редакцию 15.02.2023; после доработки 10.03.2023  
Принята к публикации 10.03.2023

Задача малоракурсной рентгеновской томографии является типичным представителем класса некорректно поставленных задач. Практическое решение этой задачи позволит расширить область применения метода рентгеновской томографии. Задача малоракурсной рентгеновской томографии часто является задачей с дефицитом исходных данных и может быть решена только с привлечением априорной информации. Для введения в численный алгоритм необходимой дополнительной информации наиболее пригодными являются методы итерационной реконструкции томографических изображений. Один из подходов для введения такого рода информации изложен в данной статье.

*Ключевые слова:* итерационные методы, реконструкция изображений, априорная информация, томография, недостаток входных данных.

DOI: 10.31857/S0130308223040048, EDN: YNVEJC

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время среди методов неразрушающего контроля особое место занимает метод рентгеновской томографии. Преимущество этого метода заключается в том, что его информативность о каждом элементарном объеме исследуемого объекта во много раз выше, чем в других известных методах. Высокая эффективность метода рентгеновской томографии впервые была продемонстрирована на примерах его использования в медицине и биологии. Создание первых рентгеновских компьютерных томографов и их применение в медицине было отмечено Нобелевской премией за 1979 г. Современное изложение принципов томографии можно найти в монографии [1].

Техническая реализация и область применения метода рентгеновской томографии жестко связаны с математическим аппаратом, который используется для реконструкции пространственного распределения коэффициента линейного ослабления рентгеновского излучения по рентгеновским проекциям, и возможностями вычислительной техники. В основу первых рентгеновских томографов было положено предложенное еще в 1917 г. двухмерное обратное преобразование Радона [2], который показал, что распределение коэффициента линейного ослабления  $\mu(x, y)$  в бесконечно тонком слое объекта однозначно определяется множеством всех линейных интегралов:

$$\mu(x, y) = \frac{1}{2\pi^2} \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \int_{\varepsilon}^{\infty} \frac{1}{q} \int_0^{2\pi} \frac{\partial}{\partial l} p(x \cos \theta + y \sin \theta + q, \theta) d\theta dq, \quad (1)$$

где  $p(l, \theta)$  — интеграл функции  $\mu(x, y)$  вдоль линии, которая удалена на расстояние  $l$  от начала координат, а ее перпендикуляр составляет угол  $\theta$  с осью  $x$ ;  $\varepsilon$  — бесконечно малая величина, стремящаяся к 0.

Основанный на преобразовании (1) принцип современной компьютерной томографии заключается в следующем. Исследуемый объект облучают во множестве ракурсов, регистрируют результаты измерений характеристик излучения, прошедшего через тонкий слой объекта, преобразуют эти результаты в числовые коды, вводят в ЭВМ, с помощью которой посредством численного обратного преобразования Радона находят пространственное распределение коэффициента линейного ослабления, которое затем визуализируют с помощью соответствующих устройств (см. работу [3], стр. 12). При этом, с одной стороны, применение обратного преобразования Радона наибо-

лее эффективно при использовании узко коллимированных источников излучения (в этом случае мал нелинейный вклад рассеянных фотонов) и электронных детекторов излучения (из-за большого объема измеряемых данных), с другой стороны, оно требует строго заданную схему просмотра объекта, требующую для удовлетворительной аппроксимации функции  $p(l, \theta)$  значительное число ракурсов (как правило, несколько сотен) при перемещении системы детектор-источник относительно объекта на угол 180 или 360°.

Дальнейшее совершенствование рентгеновских томографов было достигнуто за счет разработки и использования математического аппарата трехмерных обобщений преобразования Радона [4, 5]. Это позволило использовать конический источник излучения и двухмерный матричный детектор, что существенно увеличило скорость сбора информации для трехмерной реконструкции. Но практическое применение нашли томографы, которые используют некоторые приближенные трехмерные преобразования. Основные принципы, изложенные в данной работе, применены были также в публикациях [9—12].

## 1. ИТЕРАЦИОННЫЕ АЛГЕБРАИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РЕКОНСТРУКЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ОБЪЕКТОВ

Предельно малый объем проекционных данных, характерный для промышленных малоракурсных систем томографии, заставляет разрабатывать такие алгоритмы реконструкции, которые позволяют использовать дополнительную априорную информацию о восстанавливаемом объекте и являются легко адаптируемыми для различных нетрадиционных схем сканирования. Выбор конкретного алгоритма реконструкции определяется, прежде всего, особенностями системы томографии, точнее, особенностями регистрируемых в системе проекционных данных.

Возможны такие ситуации, когда из-за особенностей системы регистрации либо число проекций очень мало, либо они известны не полностью, либо получены в ограниченном диапазоне углов. Задачи восстановления при таком задании проекционных данных становятся сильно некорректными и для них нарушаются теоремы единственности и устойчивости. Поэтому прямое применение аналитических алгоритмов для их решения не дает приемлемых результатов и приходится разрабатывать другие, более подходящие алгоритмы. В этих случаях наиболее предпочтительными оказываются методы разложения в конечные ряды ортогональных функций.

Восстановление изображений по их проекциям при помощи методов разложения в конечные ряды принципиально отличается от методов интегральных преобразований. Дело в том, что в методах интегральных преобразований используются операторы, действующие на множестве функций, которые заданы на всем континууме вещественных чисел. И лишь для реализации решения на компьютерах и рабочих станциях непрерывные операторы заменяются на дискретные операторы, которые действуют на функциях, заданных на конечных множествах, но это выполняется в самом конце процедуры выполнения алгоритма восстановления.

Методы разложения в конечные ряды предполагают дискретизацию изображения до начала алгоритма восстановления, что сводит основную задачу восстановления к решению систем линейных (или нелинейных) алгебраических уравнений, т.е. к задачам вычислительной линейной алгебры. Известно, что систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) можно решать с помощью как прямых, так и итерационных методов. Итерационные методы применяются главным образом для задач очень большой размерности, которыми, как правило, являются задачи компьютерной томографии.

Для применения алгоритмов разложения в конечные ряды к решению задач реконструктивной вычислительной томографии первоначально необходимо построить полную дискретную модель задачи восстановления. Для этого выберем систему базисных функций  $b_j(\mathbf{x})$ ,  $j = 1, 2, \dots, J$  и рассмотрим дискретизированную форму  $\tilde{f}$  функции  $f$  по отношению к этой системе:

$$\tilde{f}(\mathbf{x}) = \sum_{j=1}^J f_j \times b_j(\mathbf{x}), \quad (2)$$

где  $f_j = \text{const}$ . Пусть  $R_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, I$  — множество линейных непрерывных функционалов, каждый из которых ставит в соответствие функции  $f(\mathbf{x})$  вещественное число  $R_i f$ , которое обозначим  $p_i$ . Тогда, применяя операторы  $R_i$  к равенству (2), учитывая их непрерывность и линейность и обозначив

$$a_{ij} = R_i b_j(\mathbf{x}), \quad (3)$$

получаем искомую СЛАУ

$$\mathbf{A}\mathbf{f} = \mathbf{p}, \quad (4)$$

где  $\mathbf{A} = (a_{ij})$  — проекционная матрица;  $\mathbf{f} = (f_1, f_2, \dots, f_j)$  — вектор изображения;  $\mathbf{p} = (p_1, \dots, p_j)$  — вектор проекций. Таким образом, решение основной задачи восстановления изображения по заданному набору проекций  $p_i$  сводится к решению СЛАУ вида (4), при этом вектор  $\mathbf{p}$  заведомо задан с некоторой погрешностью.

Существует несколько различных источников зашумления вектора  $\mathbf{p}$ : 1) вместо функции  $f(\mathbf{x})$  мы рассматриваем ее приближенное выражение в виде дискретизированной функции  $\tilde{f}(\mathbf{x})$ ; 2) вектор проекций  $\mathbf{p}$  получаем на практике из экспериментальных или практических физических измерений, которые неизбежно зашумлены; 3) при вычислении элементов  $a_{ij}$  матрицы  $\mathbf{A}$  мы предполагаем идеализацию естественных лучей, как это будет рассмотрено ниже.

Предположим, что функция  $f(\mathbf{x})$  задана в пространственной области  $V$ . Разобьем область  $V$  на некоторое конечное число подобластей, которые будем называть вокселями. Перенумеруем все воксели некоторым удобным образом от 1 до  $J$ . Будем считать, что восстанавливаемая функция  $f(\mathbf{x})$  принимает постоянное значение  $f_j$  внутри  $j$ -го вокселя, т.е. функцию  $f(\mathbf{x})$  заменяем ее дискретизированным выражением:

$$\begin{aligned} \tilde{f}(\mathbf{x}) &= f_j, \text{ если } (x) \in \text{ вокселю } j - y; \\ &0 \text{ в противном случае.} \end{aligned} \quad (5)$$

Пусть  $\{b_j(\mathbf{x})\}_1^J$  — система базисных функций, которые задаются следующим образом:

$$\begin{aligned} b_j(\mathbf{x}) &= 1, \text{ если } (x) \in \text{ вокселю } j - y; \\ &0 \text{ в противном случае.} \end{aligned} \quad (6)$$

Предположим, что в качестве линейных функционалов  $\mathbf{R}$  выбираем прямое преобразование Радона вдоль набора некоторых прямых  $L_s$ :

$$R_i \mathbf{f} = \int_{L_s} f(\mathbf{x}) ds.$$

Тогда

$$R_i b_j(\mathbf{x}) = \int_{L_s} b_j(\mathbf{x}) ds = a_{ij} \quad (7)$$

геометрически представляет собой длину пересечения  $i$ -го луча с  $j$ -м вокселем. Мы в своей статье используем именно такую систему базисных функций, другие виды базисных функций не рассматриваются в данной работе. Дискретизация является равномерной.

Из вышерассмотренного очевидна гибкость предлагаемого алгебраического подхода к решению задач восстановления. Во-первых, следует отметить свободу выбора базисных функций, что связано с выбором сетки разбиения области  $D$  (кроме декартовой квадратной сетки можно выбрать полярную сетку в двухмерном случае и вообще сетку произвольной геометрической конфигурации).

Кроме того, постановка задачи не зависит от геометрии лучей. Изменяются при этом только элементы  $a_{ij}$ , которые, как правило, вычисляются заранее. Следует также заметить, что все вышесказанное можно перенести на трехмерный случай. Таким образом, алгебраический метод при фиксированном выборе линейных непрерывных операторов  $R_i$  и базисных функций  $b_j$  сводит задачу восстановления к решению СЛАУ (4), т.е., казалось бы, к стандартной задаче вычислительной линейной алгебры. Однако применительно к проблеме реконструкции изображения данная задача имеет ряд характерных особенностей: размерность системы чрезвычайно велика:

как правило, число уравнений и неизвестных порядка  $10^7$  —  $10^{10}$ . При этом отличные от нуля элементы матрицы  $\mathbf{A}$ , в основном, не образуют никакой определенной упорядоченной структуры для того, чтобы можно было применить какой-нибудь из известных методов решения систем линейных алгебраических уравнений с разреженными матрицами; матрица  $\mathbf{A}$  является прямоугольной размера  $m \times n$ , причем  $m \neq n$ , как правило,  $m < n$  (здесь  $m$  — число уравнений, а  $n$  — число неизвестных). В последнем случае система является недоопределенной; система уравнений (4) является неустойчивой относительно задания начальных данных, т.е. малым изменениям вектора  $\mathbf{p} = (p_1, \dots, p_m)$  могут отвечать сколь угодно большие изменения вектора неизвестных  $\mathbf{f} = (f_1, f_2, \dots, f_n)$ . Эти характерные особенности превращают простую, на первый взгляд, задачу вычислительной линейной алгебры в весьма трудно реализуемую вычислительную процедуру. При этом для каждой конкретной задачи приходится подбирать наиболее оптимальный алгоритм реконструкции.

## 2. КЛАССИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ АЛГЕБРАИЧЕСКОЙ РЕКОНСТРУКЦИИ

Здесь мы рассмотрим решение задачи реконструктивной вычислительной томографии с помощью классических итерационных алгебраических методов восстановления, основанных на разложении в конечные ортогональные ряды [5]. Для случая задания систем базисных функций в виде формул (6) это приводит к необходимости решения СЛАУ вида:

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{p}, \quad (8)$$

где  $\mathbf{A} = (a_{ij})$  — проекционная матрица;  $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  — вектор неизвестных;  $\mathbf{p} = (p_1, \dots, p_m)$  — вектор проекций. Впервые применение итерационного алгебраического алгоритма для вычислительной томографии было описано в 1970 г. в работе [8]. В этом алгоритме в качестве начального приближения вектора изображений выбирается произвольное значение  $\mathbf{x}^{(0)} \in R^n$ , если система является совместной,  $(k+1)$ -я итерация получается из  $k$ -й итерации некоторым аддитивным способом. При этом последовательно в порядке перебора рассматривается только один луч, например  $i$ -й, а изменению подвергаются только те компоненты вектора  $\mathbf{x}^{(k)}$ , которые соответствуют вокселям, пересекаемым данным лучом. Величина невязки между измеренным значением  $p_i$  и приближенной величиной проекции  $\sum_j a_{ij}x_j^{(k)}$ , полученной при подстановке  $k$ -й итерации  $\mathbf{x}^{(k)}$ , перераспределяется между вокселями, расположенными вдоль  $i$ -го луча, пропорционально их весам  $a_{ij}$  в луче. Таким образом, в одном цикле  $k$ -й итерации изменяются значения только тех вокселей, которые находятся вдоль данного  $i$ -го луча, а остальные значения функции остаются без изменения. Этот алгоритм известен в литературе как ART и его можно определить следующим образом:

- 1) начальное приближение  $\mathbf{x}^{(0)} \in R^n$  выбирается произвольно;
- 2)  $k+1$ -я итерация вычисляется по формуле:

$$\mathbf{x}^{(k+1)} = \mathbf{x}^{(k)} + \lambda^{(k)} ((p_i - (\mathbf{a}^i, \mathbf{x}^{(k)})) / \|\mathbf{a}^i\|^2) \mathbf{a}^i, \quad (9)$$

где  $\mathbf{a}^i = (a_{ij})_{j=1}^n$  —  $i$ -я строка матрицы  $\mathbf{A}$ , параметры релаксации  $\lambda^{(k)}$  представляют собой последовательность вещественных чисел, а  $i = i_k = k(\text{mod}_m) + 1$ , т.е. лучи перебираются циклически. Этот алгоритм характеризуется эффективным использованием памяти, поскольку  $n$ -мерный вектор  $\mathbf{x}^{(k+1)}$  можно запоминать в том же блоке оперативной памяти, что и вектор  $\mathbf{x}^{(k)}$ , необходимость хранения которого отпадает после  $k$ -й итерации. Исследователями доказано, что он принадлежит к классу итерационных алгоритмов, основанных на методе проектирования на выпуклые множества. Однако качество реконструкции алгоритма ART уступает качеству алгоритмов SIRT, ILST и алгоритму байесовой реконструкции в силу наличия полосовых артефактов. Поэтому мы предпочтительно используем последние вышеназванные алгоритмы.

## 3. АЛГОРИТМЫ РЕКОНСТРУКЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АПРИОРНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Как отмечалось выше, на практике часто приходится решать так называемые задачи восстановления с неполным набором данных. Этого набора данных, как правило, недостаточно для решения задачи восстановления. Однако для многих таких задач, в частности для задач исследования физических процессов, бывает, что известна некоторая дополнительная информация об исходном вос-

становливаемом объекте. Эта различная априорная информация может быть эффективно учтена в алгебраических итерационных алгоритмах. Использование этой априорной дополнительной информации часто дает существенное улучшение для скорости сходимости итерационных процессов. В этом подразделе рассматриваются различные комбинации итерационных алгебраических реконструктивных алгоритмов, рассмотренных в предыдущих разделах, с использованием наиболее важной и доступной априорной информации о восстанавливаемом объекте и устанавливаются свойства сходимости таких алгоритмов.

Предположим, что итерационный алгебраический алгоритм для решения СЛАУ (4) задан в виде следующей рекуррентной формулы:

$$\mathbf{x}^{(k+1)} = Q \mathbf{x}^{(k)}, \quad (10)$$

где  $Q: R^n \rightarrow R^n$  — некоторый оператор. Дополнительную информацию об объекте в общем случае можно также задать с помощью некоторого оператора  $S: R^n \rightarrow R^n$  в виде:

$$\mathbf{x}^{(k+1)} = S \mathbf{x}^{(k)}, \quad (11)$$

тогда общий итерационный процесс будет представляться в виде суперпозиции этих двух операторов:

$$\mathbf{x}^{(k+1)} = S Q \mathbf{x}^{(k)}. \quad (12)$$

Следует при этом заметить, что не всегда из сходимости последовательности (10) к решению системы (4) следует сходимость последовательности (12) и наоборот. Операторы  $Q$  и  $S$  должны удовлетворять определенным свойствам, чтобы гарантировать эту сходимость. Заранее эти свойства неизвестны, поэтому мы практически устанавливаем их на основании численных экспериментов. Предположим, априорно известно, что искомое решение  $\mathbf{x}$  принадлежит подпространству  $L \subset R^n$ . Тогда в качестве оператора  $S$  можно взять оператор ортогонального проектирования  $P = P_L$  на подпространство  $L$ . Например, если априорно известны границы значений искомого вектора решений  $\mathbf{x}$ , т.е. известно, что  $i$ -я компонента  $x_i$  находится в интервале  $[\alpha_i, \beta_i]$ , то в качестве множества  $L$  может быть взято прямое произведение этих интервалов:

$$L = [\alpha_1, \beta_1] \times [\alpha_2, \beta_2] \times \dots \times [\alpha_n, \beta_n].$$

В этом случае оператор ортогонального проектирования  $P_L$  задается в виде:

$$P_L(x_i) = \begin{cases} \alpha_i, & \text{если } x_i < \alpha_i \\ x_i, & \text{если } \alpha_i \leq x_i \leq \beta_i \\ \beta_i, & \text{если } x_i > \beta_i \end{cases}, \quad (13)$$

несмотря на кажущуюся тривиальность этих ограничений, они являются весьма полезными при итерационной реконструкции искомого изображения.

В качестве априорного знания об объекте могут быть заранее известны также границы его протяженности, т.е. известно множество  $S \subset R^n$ , вне которого восстанавливаемая функция равна 0. В этом случае оператор проектирования на подмножество  $S$  определяется как

$$P_S \mathbf{x} = \begin{cases} x, & \text{если } x \in S \\ 0 & \text{в противном случае} \end{cases}. \quad (14)$$

Мы применим описанный выше принцип (14) введения априорной информации в итерационный процесс для реконструкции изображений алюминиевых корпусов.

Первый набор 32 рентгеновских проекций был предоставлен господином Dr. Martin Simon, сотрудником германской фирмы Зауэрвайн (Sauerwein). Все эти проекции были получены в

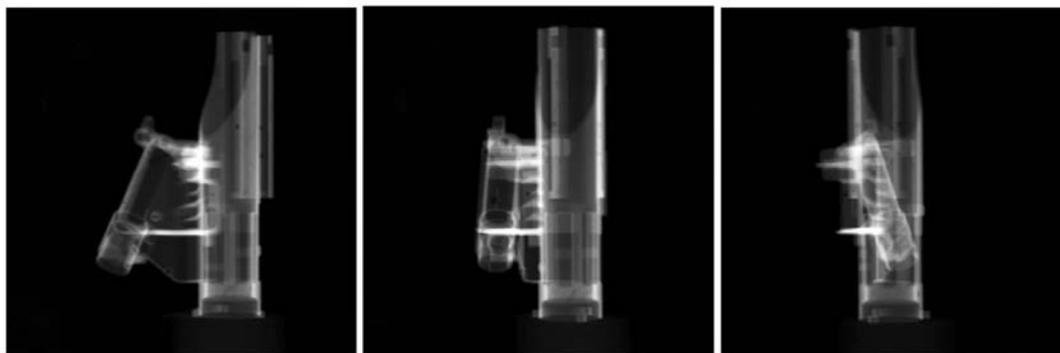


Рис. 1. Проекция алюминиевого корпуса для углов 0, 45 и 90 град.

угловом диапазоне 180 град, т.е. при одностороннем доступе к объекту реконструкции. Мы имеем характерную задачу именно для малоракурсной томографии. Число проекционных видов несколько десятков, причем все они расположены в неполном угловом диапазоне, который меньше 360 град. На рис. 1 показаны три проекции алюминиевого корпуса для углов 0, 45 и 90 град.

#### 4. ПОСТРОЕНИЕ НАЧАЛЬНОГО ПРИБЛИЖЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ИЗОБРАЖЕНИЯ АЛЮМИНИЕВОГО КОРПУСА

Для уменьшения числа вокселей, для которых необходимо оценить приближенное значение коэффициента линейного ослабления, целесообразно уменьшить их количество, исходя из принципа наблюдаемости реконструируемого объекта на всех проекциях.

Определим трехмерную область предполагаемого положения объекта:

$$Volume = \left\{ j : \sum_{n=1}^N \eta \left( \frac{Pixel_{jn}}{\varepsilon_{jn}} \right) = N \right\}, \quad (15)$$

где  $\eta(x)$  — пороговая функция:

$$\eta(x) = \begin{cases} 1, & x > 1 \\ 0, & x \leq 1 \end{cases}$$

Это означает, что воксель  $j$  принадлежит  $Volume$ , если значения соответствующих ему пикселей  $Pixel_{jn}$ , в которые он проецируется, больше некоторого минимального значения на всех проекциях. В соответствии с (15) воксель  $j$  принадлежит  $Volume$ , если значения соответствующих ему пикселей превышают погрешность измерения  $\varepsilon_{jn}$  на всех  $N$ -проекциях.

Все воксели пронумерованы последовательно. Это всегда используется при преобразовании трехмерного массива в одномерный с целью упрощения программного кода. Заметим, что по индексам конкретного вокселя  $(i, j, k)$  этот одномерный индекс вычисляется однозначно:  $position = dims[0] * (dims[1] * k + j) + i$ , где  $dims[0]$  и  $dims[1]$  — размерности зоны реконструкции по осям абсцисс и ординат. Верно и обратное утверждение: по индексу  $position$  можно однозначно восстановить индексы конкретного вокселя  $(i, j, k)$ .

Сначала на рис. 2 покажем перспективные изображения реконструируемого объекта для разного числа итераций, когда в качестве начального приближения взята вся область реконструкции.

Далее на рис. 3 покажем перспективные изображения реконструируемого объекта для разного числа итераций, когда в качестве начального приближения взята область  $Volume$ . Понятно, что при этом мы учитываем априорную информацию о пространственном положении объекта реконструкции. Роль подмножества  $S$  в соотношениях (14) играет подмножество зоны реконструкции  $Volume$ .

Видно, что при использовании второго способа выбора начального приближения мы более точно и качественно восстанавливаем форму и внутреннюю структуру объекта.

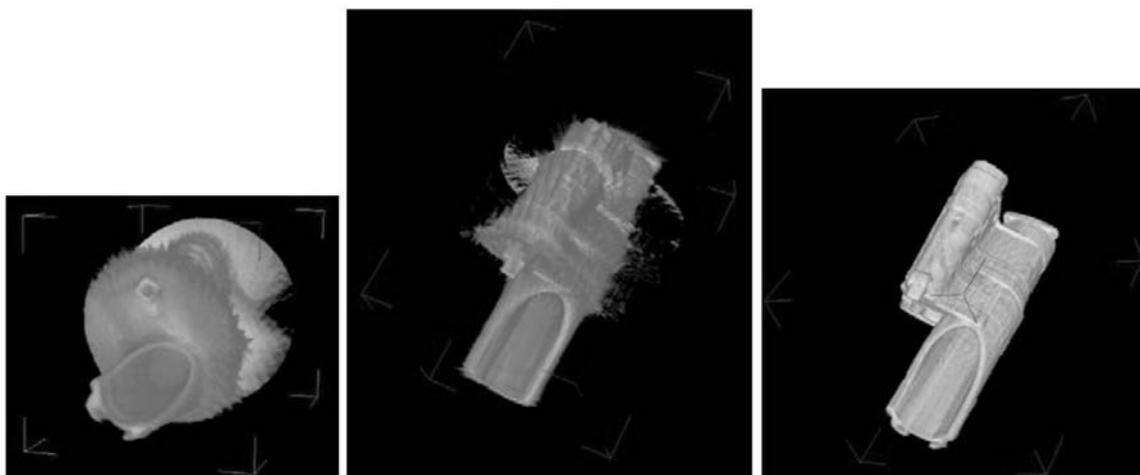


Рис. 2. Перспективные изображения алюминиевого корпуса для 1, 5 и 10 итераций. Начальное приближение: вся зона реконструкции.

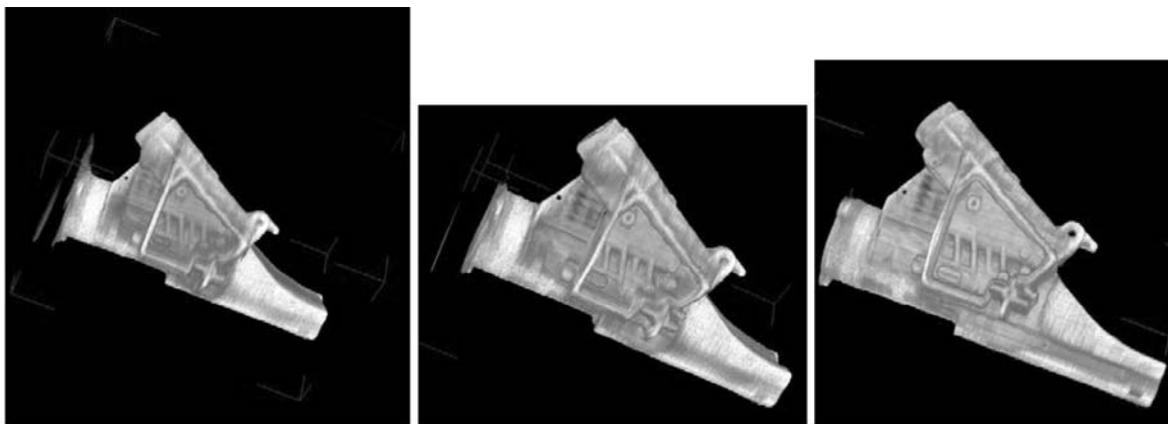


Рис. 3. Перспективные изображения алюминиевого корпуса для 5, 10 и 30 итераций. Начальное приближение: область *Volume*.

## 5. РЕКОНСТРУКЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АПРИОРНОЙ ИНФОРМАЦИИ О ГРАНИЦАХ ЗНАЧЕНИЙ РЕШЕНИЯ

Поскольку коэффициент ослабления алюминиевого корпуса является однородным, мы можем использовать условие (13) для улучшения качества реконструкции изображения. Путем умножения всех проекций на некоторый постоянный коэффициент можно так откалибровать их, что плотность реконструируемого объекта станет равной единице. Денкевич Ю.Б. в кандидатской диссертации [6] для улучшения выполнения условий (13) для вокселей, границы значений которых принадлежат отрезку  $0 < x_j \leq 1, j = 1 \dots N$ , предложил одновременно минимизировать функционал  $B(x) = (4,0 \times x \times x] - 6,0 \times x + 2,0)$ . Численный алгоритм решения нашей задачи можно построить с помощью вариационной задачи минимизации функционала:

$$\tilde{x} = \arg \min_{x \in Volume} \{ \|Ax - p\|^2 + \alpha B(x) \}, \quad (16)$$

где  $\tilde{x}$  — приближенное решение уравнения  $\hat{A}x = p$ ;  $\|Ax - p\|^2$  — невязка;  $B(x)$  — стабилизирующий функционал;  $\alpha$  — параметр регуляризации.

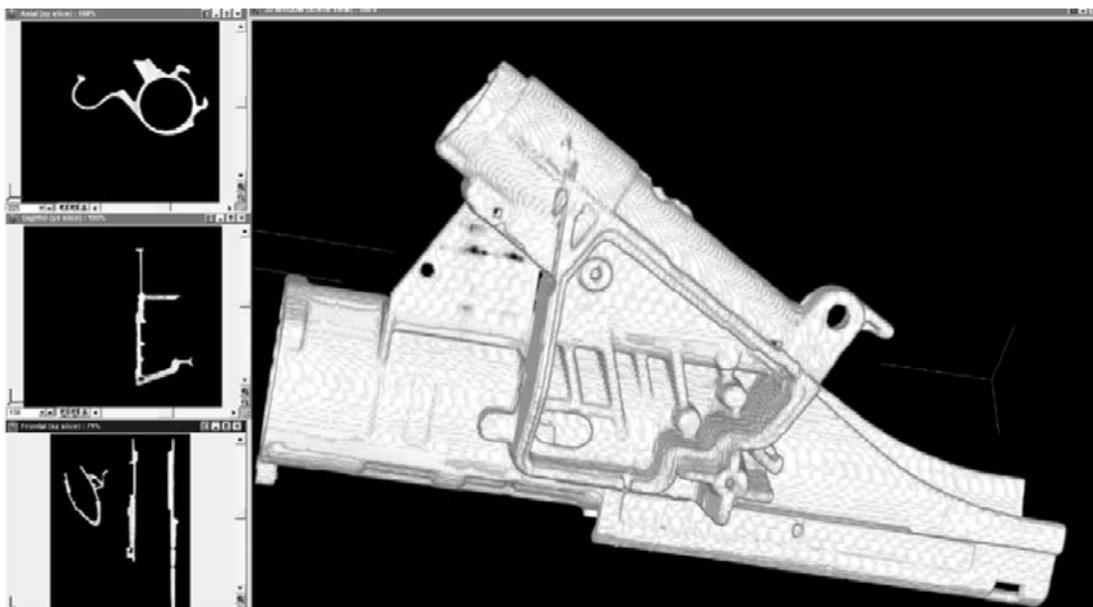


Рис. 4. Изображение алюминиевого блока, которое получается при учете априорной информации с помощью решения вариационной задачи (16). Слева показаны центральные ортогональные сечения объекта.

На рис. 4 показано изображение алюминиевого блока, которое получается при решении вариационной задачи (16).

Второй набор из 2300 рентгеновских проекций был предоставлен Иваном Георгиевым, научным сотрудником Института информационных и коммуникационных технологий (ИИКТ) Болгарской академии наук. Они были получены на промышленном томографе ХТ Н 225 фирмы Nikon Metrology. Проекции имели размерности  $1840 \times 1446$  пикселей. Размер пикселя был равен  $0,127 \times 0,127$  мм. Расстояние от рентгеновского источника до матрицы детекторов было равно 1009 мм, а расстояние от источника до объекта — 775 мм. Угловой шаг был равен  $0,156^\circ$ . Была произведена реконструкция алюминиевого бокса итерационным методом SART по 575 проекциям, снятым через угловой интервал  $0,626^\circ$ . На рис. 5 показаны различные перспективные виды реконструированного изображения алюминиевого бокса.

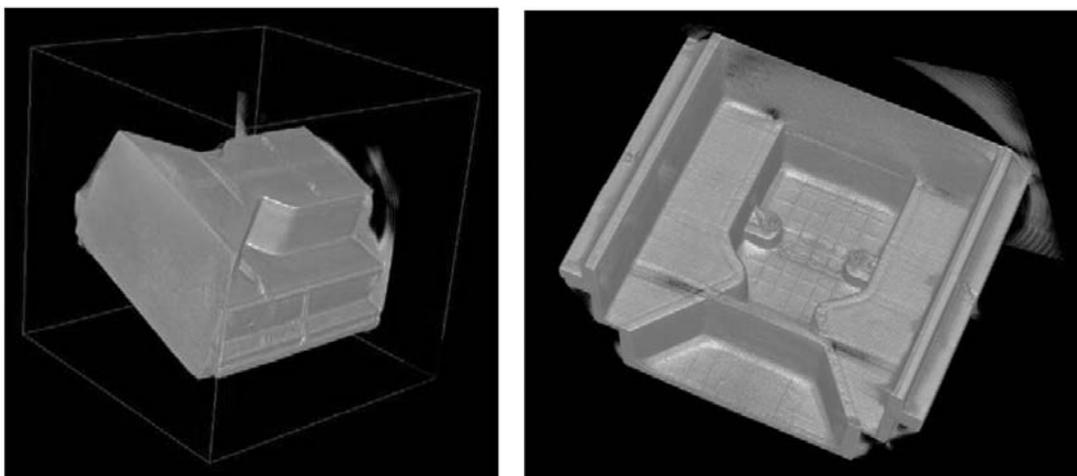


Рис. 5. Два различных перспективных вида алюминиевого бокса.

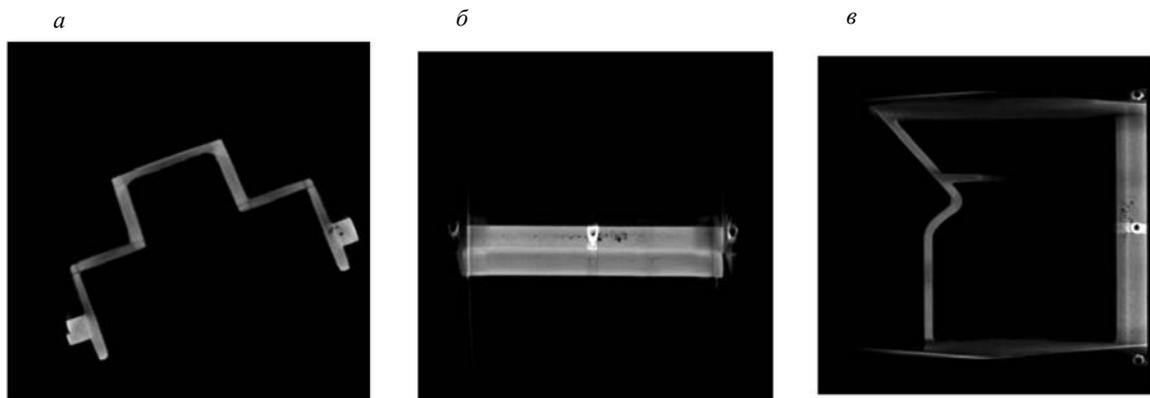


Рис. 6. Сечения изображения алюминиевого бокса плоскостями  $XOZ$ ,  $YOZ$  и  $XOY$ :  
 а — слой  $XOZ$  360 вдоль оси  $OY$ ; б — слой  $YOZ$  646 вдоль оси  $OX$ ; в — слой  $XOY$  328 вдоль оси  $OZ$ .

На рис. 6 показаны сечения трехмерного реконструированного изображения алюминиевого бокса плоскостями  $XOZ$ ,  $YOZ$  и  $XOY$  в месте расположения поры максимального размера, обнаруженной в слое  $XOZ$  № 360 при анализе изображения объекта вдоль оси  $OY$ . ПО VGStudioMAX позволяет одновременно выводить сразу все три этих изображения на дисплей и проводить виртуальные измерения размеров поры на каждом из этих изображений. Оцененный размер этой поры равен 1,5 мм.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Результатом проведенных экспериментальных исследований является подтверждение возможности решения задачи малоракурсной рентгеновской томографии для конкретного класса объектов алюминиевого литья. Разработка прикладных численных алгоритмов решения данной задачи для этого класса объектов позволит расширить область применения метода рентгеновской томографии для неразрушающего контроля изделий, содержащих такие распространенные дефекты, как поры, включения, расслоения, трещины, раковины и т.п.

Вклад авторов является одинаковым по 33 %.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Herman Gabor T.* Fundamentals of Computerized Tomography. Image Reconstruction from Projections. Second Edition. Springer-Verlag London Limited. 2009. 297 p.
2. *Radon J.* Über die Bestimmung von Funktionen durch ihre Integralwerte langs gewisser Mannigfaltigkeiten. Ber. Verb. Saechs. Akad. Wiss., Leipzig, Math. Phys. Kl. 1917. № 69. P. 262—277.
3. *Тихонов А.Н., Арсенин В.Я., Тимонов А.А.* Математические задачи компьютерной томографии. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. 160 с.
4. *Smith Bruce D.* Cone-beam tomography: recent advances and a tutorial review // *Optical Engineering*. 1990. V. 29. No. 5. P. 524—534.
5. *Reimers P., Goebbels J.* History of computerized tomography at BAM / Int. Simp. on Computerized Tomography for Industrial Applications. Berlin. Juni 1994. P. 13—22.
6. *Венгринович В.Л., Золотарев С.А.* Итерационные методы томографии. Минск: Белорусская наука, 2009. 227 с.
7. *Денкевич Ю.Б.* Восстановление изображений и свойств объектов путем решения обратных задач малоракурсной рентгеновской томографии и магнитошумовой структуроскопии / Дисс. Минск: ИПФ НАН Беларуси, 2000. 138 с.
8. *Gordon R., Bender R., Herman G.T.* Algebraic reconstruction techniques (ART) for three-dimensional electron microscopy and X-ray photography // *J. Theor. Biol.* 1970. No. 29. P. 471—481.
9. *Krammer J., Zolotarev S.A., Hillman I.* Evaluation of a new image reconstruction method for digital breast tomosynthesis: Effects on the visibility of breast lesions and breast density // *The British journal of radiology*. 2019. V. 92. No. 1103. DOI: 10.1259/bjr.20190345
10. *Zolotarev S.A., Vengrinovich V.L., Smagin S.I.* Iterative tomography of pipes during operation // *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus Physical. Technical Series*. 2021. V. 66. No.4. P. 505—512.

11. Золотарев С.А., Савеня П.С., Жуков К.А., Седнина М.А. Метод неразрушающего контроля толщины стенок и внутренней дефектности металлической трубы // Системный анализ и прикладная информатика. 2020. № 3. С. 28—33.

12. Золотарев С.А., Таруат А.Т., Биленко Э.Г. Оценка влияния уровня шума на точность реконструкции изображения промышленного изделия // Системный анализ и прикладная информатика. 2022. № 4. С. 38—44.

---

## НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ СПЛАВА АЛЮМИНИЯ НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТЕПЛООВОГО ПРОЦЕССА СВАРКИ И КОМПЬЮТЕРНОЙ МИКРОТОМОГРАФИИ

© 2023 г. В.И. Сырякин<sup>1,\*</sup>, М.Д. Хильчук<sup>1,\*\*</sup>, С.А. Клестов<sup>1,\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
Россия 634050 Томск, пр. Ленина, 36  
E-mail: \*svi\_tsu@mail.ru; \*\*ma6a70@gmail.ru; \*\*\*klestov\_simon@mail.ru

Поступила в редакцию 09.02.2023; после доработки 13.03.2023  
Принять к публикации 17.03.2023

Контроль прочности сварных соединений применяется во многих отраслях производства. Рентгеновская микротомография как метод неразрушающего контроля позволяет не только выявить наличие дефектов, но и классифицировать их и оценить размеры трещин и дефектов нетрещиноподобного типа (пор). В данной статье рассматривается неразрушающий контроль сварных соединений сплава алюминия 6061 Т6 с помощью компьютерной микротомографии и математической модели теплового процесса сварки, реализованной в ANSYS Workbench. Приводятся экспериментальные результаты работы рентгеновского микротомографа, произведена оценка размеров дефектов в данном образце. С помощью математической модели получены термические истории, при которых образовались дефекты.

*Ключевые слова:* неразрушающий контроль, сварной шов, дефектоскопия, рентгеновский 3D-микротомограф, математическое моделирование.

DOI: 10.31857/S013030822304005X, EDN: YPDLFA

### ВВЕДЕНИЕ

Сварка алюминия применяется во многих отраслях промышленности и производства. Сварное соединений деталей необходимо на машинном производстве, в технических конструкциях. Кроме того, при длительной эксплуатации различных технических и энергетических комплексов могут возникать дефекты, которые будут критическими в данной отрасли и приводить к неисправной работе. Наиболее часто для сплавов алюминия применяется аргонодуговая сварка, в этом случае сварной шов имеет высокое качество по сравнению с другими методами сварки. Однако при несоблюдении подготовки, сборки и технологии сварки в сварном шве могут возникнуть дефекты, приводящие к браку [1]. Возникают такие дефекты, как трещины, поры, непровары, наплывы, смещение, подрезы и др. [2, 3]. При этом дефекты типа непроваров, смещений и подобных возникают из-за человеческого фактора либо внешних воздействий. Дефекты такого типа зачастую можно обнаружить внешним осмотром либо с помощью методов машинного зрения, которые применяются для автоматизации процесса на производствах [3]. Два основных вида дефектов, которые невозможно идентифицировать осмотром внешней поверхности шва, это внутренние трещины и поры.

Поскольку наличие дефектов в сварных швах может приводить к изменениям механических свойств материала и некорректной работе конечных конструкций, ставится задача эффективного контроля сварных соединений на ранних этапах производства. Поскольку с помощью визуально-измерительного контроля или контроля внешней поверхности сложно выявлять дефекты в размерном диапазоне десятых долей мм, то применяются методы неразрушающего контроля [2]. Рентгеновская 3D-микротомография позволяет без разрушения образца исследовать его внутреннюю структуру на микронном уровне [4—11].

В сравнении с другими методами неразрушающего контроля установлено, что контроль с помощью цифровой рентгеновской томографии позволяет выявлять трещиноподобные дефекты, мелкие сферические поры, грушевидные полости и др. [12, 13]. Рассматриваются такие дефекты как подрезы, которые располагаются вблизи сварного шва и проводится их численный анализ методом конечных элементов для оценки критических дефектов при усталостной нагрузке [14]. Исследуются дефекты, которые могут возникнуть при таких параметрах сварки, как напряжение, ток и скорость сварки. Так же возможно моделирование геометрии сварного шва на основе предсказания этих параметров сварки, ширина трещины может предлагаться для прогнозирования глубины трещины [15, 16, 18]. Рентгеновская компьютерная томография применяется как метод неразрушающего контроля для раздела зоны подложки и зоны проплавления в сварном шве алюминия, что важно для выявления непровара [17]. Предлагаются различные классификации дефектов сварных соединений, периодических структур дефектов, а также воздействующих факторов на

сварные соединения для разработки оптимальных расчетных схем сварных швов, так же для классификации дефектов по изображениям, полученным рентгеновским томографом, применяются методы с использованием сверточных нейронных сетей [19—22]. Исследуется зависимость наличия дефектов разных видов на механические свойства сварного шва и на его усталостную прочность в частности [23, 24].

Кроме того, для прогнозирования появления дефектов сварных швов важно изучить физический процесс образования сварного шва. В настоящее время используются различные модели движущегося источника тепла для расчета параметров теплового процесса сварки, к объемным источникам теплоты относятся источники с нормальным распределением по осям, эллиптические и сферические источники тепла [25]. В ходе сварки происходит плавление материала с фазовым переходом в жидкое состояние с большим выделением тепла, для такого процесса возможно составить математическую модель на основе уравнения теплопроводности и получить численное решение, которое можно сопоставить с экспериментальными данными образца [26—35]. Для моделирования процесса сварки активно используются математические модели, основанные на уравнении теплопроводности с граничными условиями конвекции и движущимся источником тепла, которые могут решаться методом конечных элементов с помощью ANSYS Workbench [28—33].

В качестве метода неразрушающего контроля в данной работе рассматривается рентгеновская 3D-микротомография. Используется рентгеновский микротомограф, обладающий повышенной точностью и быстродействием восстановления и анализа трехмерной структуры объекта [7, 36]. Был подготовлен образец из сплава алюминия, на котором присутствует сварной шов, полученный методом аргонодуговой сварки или TIG (Tungsten Inert Gas) сварки. С помощью разработанного НИ ТГУ программного обеспечения для рентгеновского микротомографа получена реконструированная 3D-модель данного образца, которая позволяет получить количественную оценку размеров дефектов на данном образце.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Экспериментально исследовали сварное соединение из сплава алюминия 6061 T6, которое получено на заготовке размерами  $250 \times 121 \times 2,4$  мм, длина сварного шва 242,68 мм. Сварное соединение получено методом TIG-сварки в Международной лаборатории «Систем технического зрения» НИ ТГУ. Сварка происходила при комнатной температуре ( $T = 22$  °C) в естественной воздушной среде с последующим охлаждением при этих же условиях. Изучали элемент сварного шва, который вырезан из основной заготовки. Размеры этого элемента  $16 \times 18 \times 2,4$  мм, при этом толщина сварного шва относительно плоскости вырезанного элемента суммарно равна 1,2 мм по обоим направлениям нормали к плоскости элемента. Внутреннюю структуру данного сварного элемента рассматривали рентгеновским микротомографом SkyScan 1172 в режиме 120 кВ, 10 Вт [4]. На рис. 1а представлен вырезанный элемент сварного шва для исследования на рентгеновском 3D-микротомографе, на рис. 1б представлена его реконструкция.

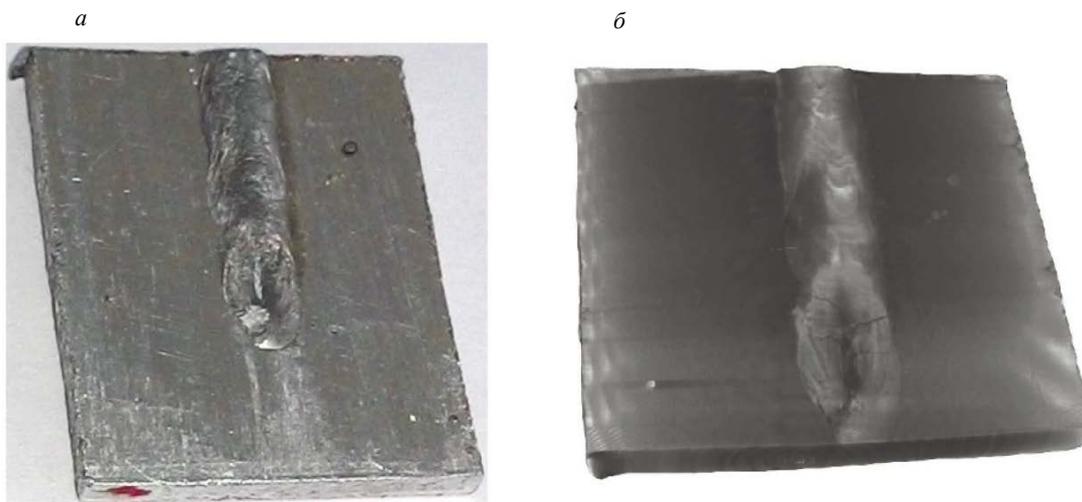


Рис. 1. Образец сварного шва: фотография вырезанного из заготовки элемента сварного шва сплава алюминия (а); 3D-реконструкция образца, полученная рентгеновским 3D-микротомографом (б).

В результате эксперимента было выявлено наличие дефектов, оценку размеров этих дефектов осуществляли с помощью программного обеспечения. Работа программного обеспечения заключается в сегментации дефекта на основе разной градации серого в пикселях среза полученного 3D-изображения и дальнейшем вычислении размеров дефектов при известном размере одного пикселя. Длина объекта находится по формуле:

$$l_o = \frac{g l_d}{H} = \frac{g w_d l_d}{H \sqrt{4H^2 + w_d^2}},$$

где  $w_d$  — ширина детектора;  $l_d$  — длина детектора;  $H$  — расстояние от трубки до детектора;  $g$  — расстояние от трубки до оси вращения исследуемого объекта.

Размер пикселя рассчитывается как произведение размера вокселя на геометрическое увеличение  $M$  ( $M = H/g$ ):

$$p = vM = v \frac{H}{g}.$$

Срезы изображений были получены в разных плоскостях, что позволило сделать выводы о распределении дефектов, их концентрации, а также классифицировать их [38].

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Рассматривается математическая модель процесса сварки, которая состоит из уравнения теплопроводности, конвекционных и радиационных граничных условий и движущегося источника тепла. В общем виде для декартовой системы координат уравнение теплопроводности имеет вид:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_v,$$

где  $c$  — теплоемкость материала;  $\rho$  — плотность;  $\lambda$  — теплопроводность материала;  $q_v = q(x, y, z, t)$  — функция, описывающая распределение удельной мощности объемного источника теплоты. Задается начальное условие в виде  $T(x, y, z, 0) = T_n = \text{const}$ ,  $T_n = 22$  °C. Общее время сварки составляет 100 с, время действия источника тепла — 50 с.

Граничные и радиационные условия конвекции задаются одновременно на всей поверхности заготовки кроме поверхности сварного шва:

$$\lambda \text{grad} T = \alpha(T - T_c);$$

$$q_{\text{rad}} = \varepsilon \sigma (T_{\infty}^4 - T_w^4).$$

При этом  $q_{\text{rad}}$  задает тепловые потери за счет излучения. Движущийся источник тепла  $q$  имеет гауссовское распределение и задается только на поверхности сварного шва:

$$q = C_2 \exp \left[ -\frac{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2}{C_1^2} \right],$$

$(x_0, y_0, z_0)$  — координаты центра движущегося источника тепла;  $y_0 = v \times t$ ,  $x_0 = 0$ ,  $z_0 = 0$ , поскольку источник тепла движется только в направлении оси  $y$ ;  $C_1 = 0,002$  м — диаметр электрода,  $C_2 = 11 \times 10^7$  Вт/м<sup>3</sup> — удельная мощность источника; скорость сварки  $v = 0,005$  м/с [29, 32].

Для получения расчетов численной модели использовали программный пакет ANSYS Workbench 2022 R2, геометрия построена с помощью DesignModeler, ANSYS Mechanical применяли для построения конечно-элементной сетки, задания граничных и начальных условий и получения решения задачи методом конечных элементов. Количество узлов сетки 127152, количество элементов 80150, использовали тетраэдрическую сетку со сгущением вдоль сварного шва [37]. На рис. 2 представлена конечно-элементная сетка свариваемой пластины, полученная с помощью ANSYS Mechanical.

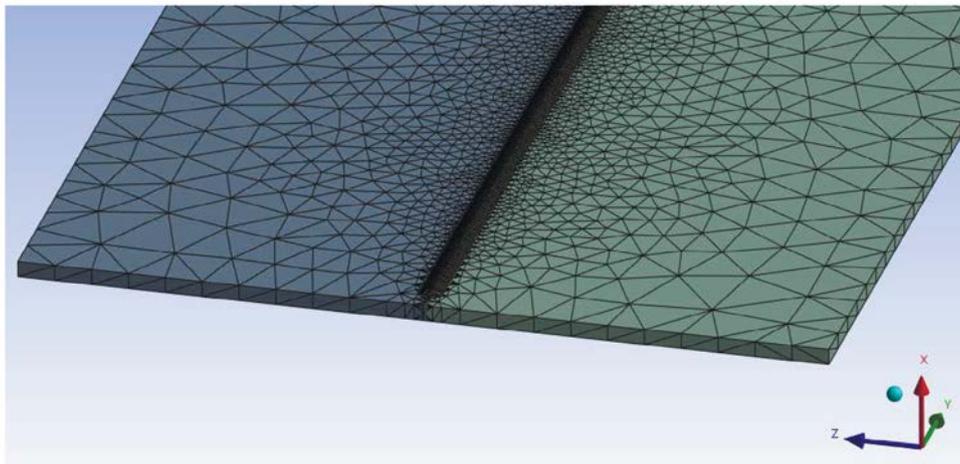


Рис. 2. Конечно-элементная сетка свариваемой пластины, полученная с помощью ANSYS Mechanical, зеленый и серый цвет — свариваемая пластина, оранжевый — сварной шов.

## РЕЗУЛЬТАТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

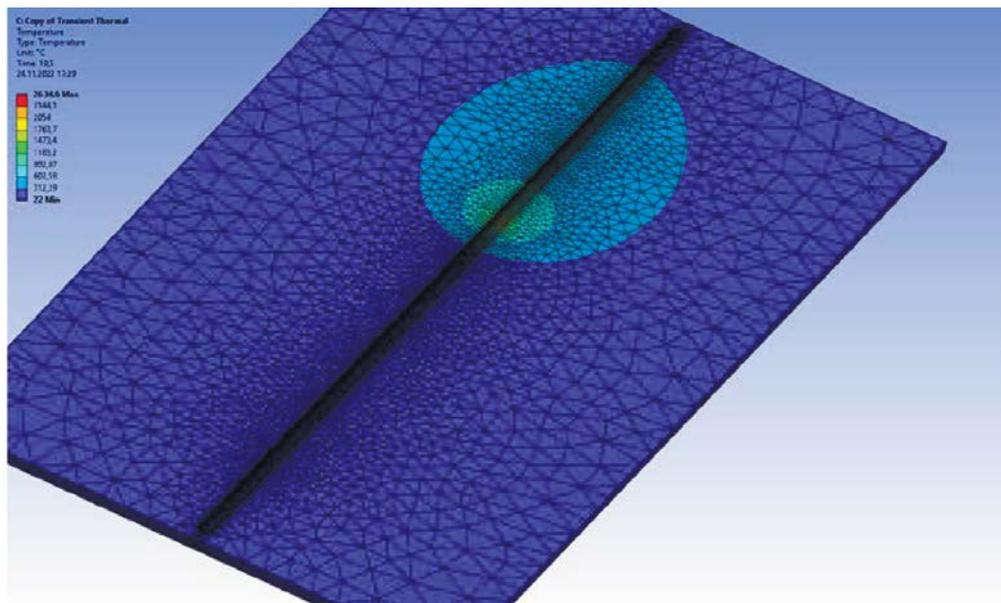


Рис. 3. Модельное поле температур в процессе сварки в момент времени  $t = 19,5$  с.

На рис. 3 представлено поле температур в процессе сварки, полученное с помощью программного пакета ANSYS Mechanical. Исследовали термические истории в трех точках начала сварного шва и в трех точках конца сварного шва (рис. 4). Расстояние между точками 1 и 2 равно 0,0006 мм, между точками 2 и 3 — 0,0028 мм. Между точками 4, 5 и 6 конца сварного шва расстояния такие же. На рис. 5 представлено модельное поле температур в конце сварки. Здесь видно, как температура меняется от комнатной и достигает максимума в конце процесса сварки. На рис. 6 представлены графики термической истории в начале сварного шва, точки 1, 2, 3.

На рис. 7 представлены графики термической истории в конце сварного шва, точки 4, 5, 6.

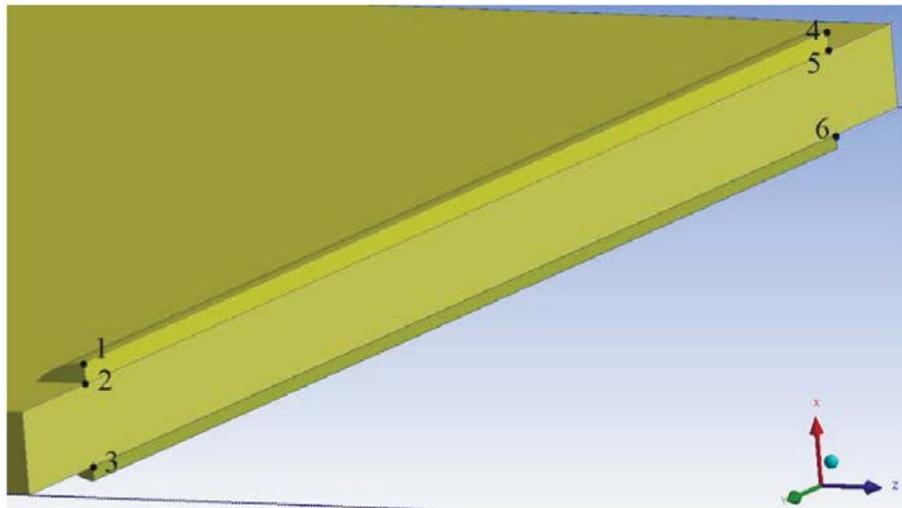


Рис. 4. Разрез сварного шва в плоскости XY: точки 1, 2, 3 — начало сварного шва; точки 4, 5, 6 — конец сварного шва.

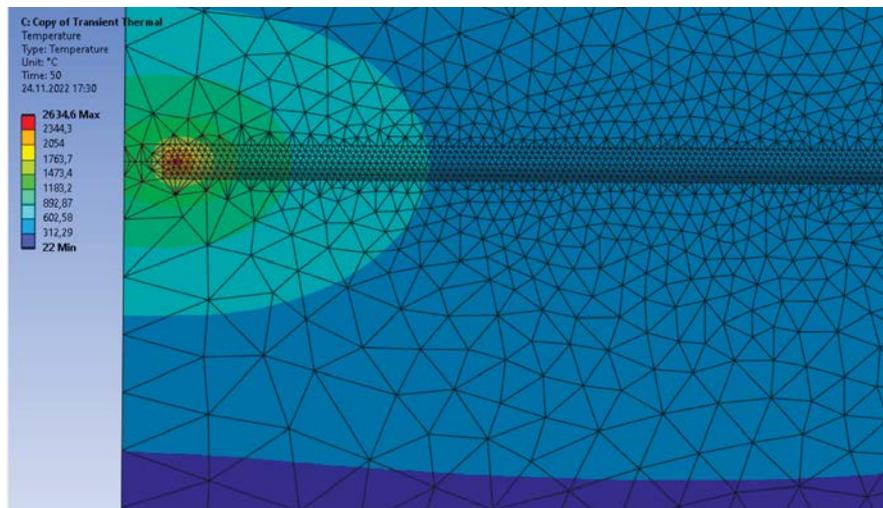


Рис. 5. Поле температур в конце сварки.

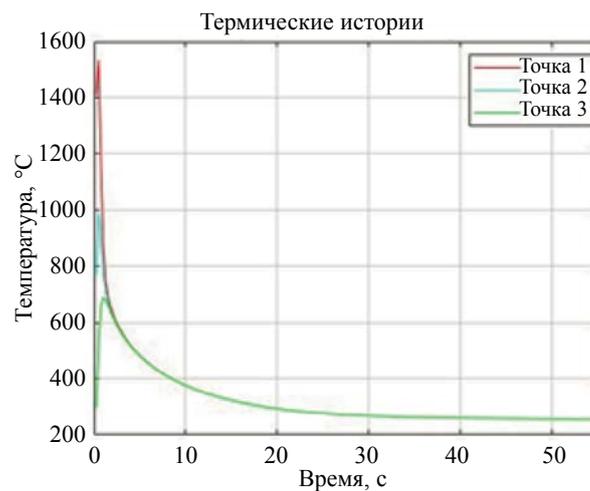


Рис. 6. Графики термической истории в начале сварного шва, точки 1, 2, 3.

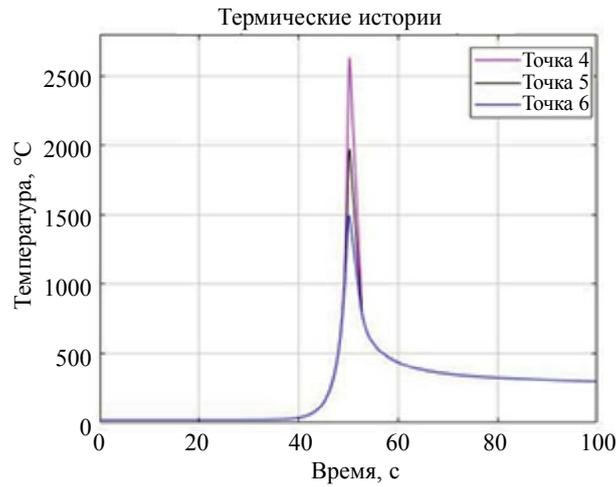


Рис. 7. Графики термической истории в конце сварного шва, точки 4, 5, 6.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Реконструкции получены в цветовой палитре, где каждому цвету соответствует разное значение плотности материала (рис. 8, 9).

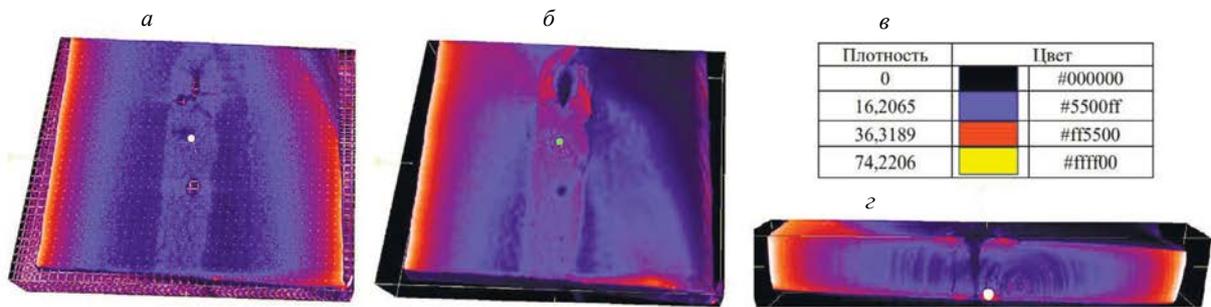


Рис. 8. Реконструкции элемента сварного шва: *а* — реконструкция образца в плоскости, которая соответствует точке 2 начала сварного шва и точке 5 конца сварного шва (см. рис. 4); *б* — реконструкция со срезом в плоскости, параллельной плоскости *YZ*; *в* — палитра цветов реконструкции; *г* — реконструкция сварного шва вдоль дефекта: кратер.

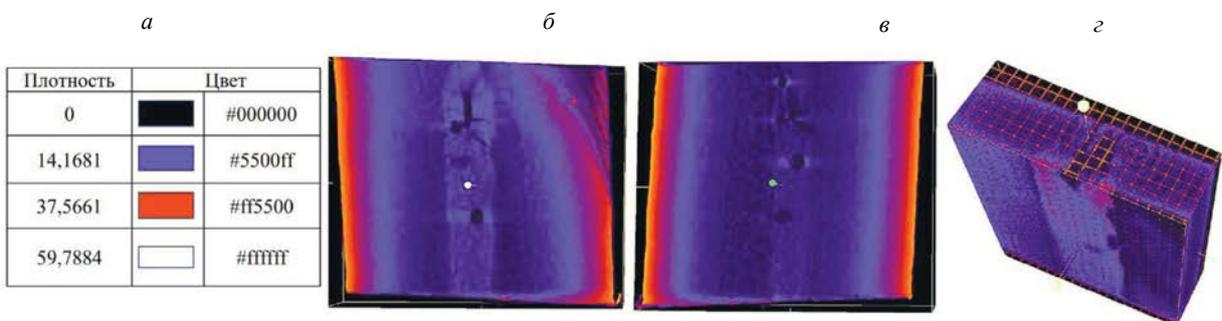


Рис. 9. Реконструкции элемента сварного шва: *а* — палитра цветов реконструкции; *б* — срез реконструированного сварного шва вблизи поверхности свариваемых пластин; *в* — реконструкция образца в плоскости, которая соответствует точке 3 начала сварного шва и точке 6 конца сварного шва (см. рис. 4); *г* — реконструкция сварного шва вдоль дефекта: кратер.

На рис. 8, 9 представлены трехмерные изображения вдоль внутренней структуры сварного шва и в плоскости, перпендикулярно самой пластине элемента образца. Изображения получены от начала сварного шва к его концу и вдоль плоскостей, на которых расположены точки.

На рис. 8а продемонстрирована реконструкция образца в плоскости, которая параллельна плоскости  $YZ$  (см. рис. 2) и проходит через две точки: точку 2 начала сварного шва и точку 5 конца сварного шва (см. рис. 4б). В соответствии с результатами математического моделирования получено, что в данной плоскости температура в процессе сварки менялась в диапазоне 689 — 2634 °С. Сетка реконструкции задана размером 0,5×0,5 мм. В данной плоскости наблюдаются дефекты типа пор и трещин, а так же кратер. Видно, что плотность материала образца увеличивается по мере приближения к его краю, что объясняется характером теплового воздействия на образец. На рис. 8б показана реконструкция со срезом в плоскости, параллельной плоскости  $YZ$ .

На рис. 8г представлена реконструкция в конце сварного шва, что соответствует плоскости, проходящей через точки 4, 5, 6 (см. рис. 4), перпендикулярно направлению сварного шва вдоль оси  $X$ . По результатам моделирования получено, что к концу сварки температура значительно выросла по сравнению с началом и составила 1489—2634 °С. Визуальный осмотр показывает наличие крупного кратера и с помощью рентгеновской реконструкции получено изображение его внутренней структуры. Кроме того, были получены реконструкции в другой цветовой палитре (рис. 9).

На рис. 10 представлены срезы, полученные с 3D-реконструкции элемента сварного шва в плоскости  $XZ$ , перпендикулярно направлению сварного шва в его конце. Срезы проведены по мере возрастания расстояния от края пластины, который ближе к концу сварного шва (точки 2, 4, 6) до середины кратера. С помощью встроенного программного обеспечения сделана оценка размеров дефектов сварного шва. Обнаружено, что имеются дефекты типа пор размерами 0,34 — 0,74 мм, трещины соответственно размерами 0,63 — 2,48 мм и так же оценен размер глубины кратера (см. рис. 8, 9), который составил 2,46 мм. При рассмотрении срезов трехмерной реконструкции сварного шва наблюдаются поперечные трещины, которые так же видны на рис. 8г. Продольные трещины отходят от кратера и находятся вблизи поверхности (рис. 8а, 8б, 9б, 9в). Преимущественно трещины и поры локализируются вокруг кратера.

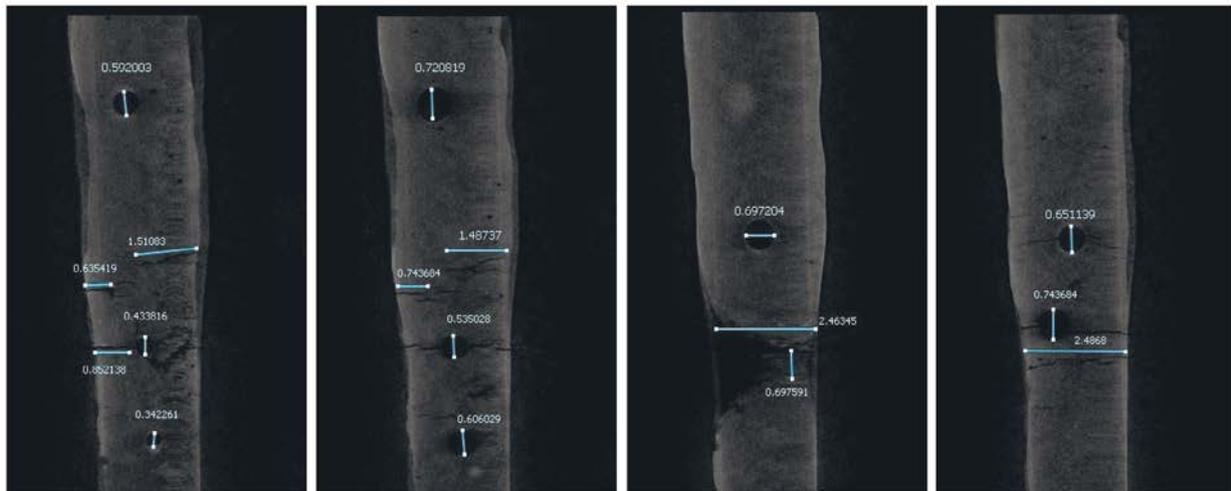


Рис.10. Срезы 3D-изображения элемента сварного шва в плоскости  $XZ$ , перпендикулярно направлению сварного шва в его конце.

Так же можно наблюдать, что дефект в виде поры, запечатленный на рис. 9 вблизи кратера, имеет пространственную структуру, согласно которой он имеет множество отходящих поперечных трещин. Далее, производя срезы 3D-изображения в плоскости  $XZ$ , перпендикулярно направлению сварного шва, можно наблюдать как рассматриваемый дефект уменьшился и вместе с тем появились поры достаточно крупных размеров (см. рис. 10). Кроме того, визуальный осмотр сварного шва показывает наличие брызг, полученных во время процесса сварки.

## ВЫВОДЫ

В данной работе использовалась рентгеновская 3D-микротомография как метод неразрушающего контроля применительно к конструкционным материалам. Исследовался сварной шов, полученный TIG-сваркой, на пластине из сплава алюминия 6061 Т6. Выявлено наличие таких дефектов, как трещины, поры, кратер и брызги, полученные во время сварки. Оценено их расположение относительно сварного шва и проведена оценка их размеров. Поиск дефектов и оценка их размеров осуществляли с помощью нейросетевых методов. Была составлена математическая модель на основе уравнения теплопроводности с конвективным и радиационными граничными условиями и гауссовским распределением движущегося источника тепла. Получено поле температур во время всего процесса сварки. В трех точках начала и конца сварного шва получены графики термической истории. По полученным термическим историям оценено, что температура в процессе сварки менялась от 689 °С в начале сварки до 2634 °С в конце. Распределение дефектов: в конце сварного шва имеется кратер размерами 0,5×2,0 мм, получена его реконструкция в плоскости, перпендикулярной пластине образца, кратер имеет характерные геометрические размеры. С помощью математического моделирования оценено, что температура, при которой получился такой дефект, была 1489—2634 °С. Так же наблюдаются дефекты смешанного типа: пора в совокупности с трещиной, такой дефект происходит из-за того, что пора была образована во время сварки, а при застывании шва вблизи поры образовалась трещина.

Таким образом, математическое моделирование теплового процесса сварки TIG методом в ANSYS Workbench позволяет получить значения термической истории в различных точках сварного шва, которые соответствуют физике протекаемого процесса. В конце сварки, согласно результатам математического моделирования, максимальная температура достигла значения выше температуры кипения алюминия, что соответствует образованию множественных пор. Однако математическое моделирование не позволяет достоверно оценить размеры сварного шва (длину и ширину), например, на рис. 5 заметно, что температурное поле, которому соответствует температура плавления, значительно превышает границы действительного сварного шва. Дефекты в виде пор расположены преимущественно в середине сварного шва вокруг кратера, их размеры 0,34—0,74 мм, причем поры имеют больший размер в глубине сварного шва. Трещины располагаются ближе к концу сварки, вокруг кратера находятся трещины размерами 0,63—2,48 мм. Так же с помощью палитры цветов на реконструкциях, полученных рентгеновским микротомографом, оценена плотность материала образца. Ближе к краям пластины плотность значительно возрастает, что соответствует 59,7884 и 74,2206 на разных палитрах, так же видно, что поверхность самого сварного шва имеет большую плотность по сравнению с поверхностью, на которой происходила сварка.

По итогам работы можно сделать вывод, что появление множественных дефектов сварного шва может быть объяснено тем, что процесс сварки происходил не по стандарту. Сравнение дефектов в начале и конце сварного шва позволяет выделить их особенности, так именно в конце сварного шва наблюдается характерный для таких температур плавления кратер. Сварочный процесс длился достаточно долго, так что пластина значительно нагрелась за счет теплопроводности и к концу сварки уже достигла высокой температуры, что и привело к образованию кратера, отходящих от него трещин и пор вдоль всего сварного шва. Тип дефектов и их распределение, а так же геометрические параметры сварного шва, соотносятся с литературными данными [2, 3, 14—23, 34]. Математическое моделирование позволяет установить температуры образования дефектов, однако геометрические характеристики сварного шва оценивать с его помощью является недопустимым. Данные, полученные с помощью математической модели, необходимо сравнивать с данными экспериментального образца. Более точная модель теплового процесса сварки может быть получена с помощью использования другой модели движущегося источника тепла, а именно модели Голдака.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00389, <https://rscf.ru/project/22-19-00389/>

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хейдари М.А., Пантелеенко А.Ф. Математическое моделирование сварочных деформаций в тонких пластинах // Наука и техника. 2011. № 5. С. 18—25.
2. Передельский В.А., Харченко В.Я., Черногоров А.Л., Тихонов С.В. О выявлении трещиноподобных дефектов сварки существующими методами контроля качества // Передовые инженерные исследования. 2021. Т. 21. №. 1. С. 89—95.

3. *Муравьев С.В., Погадаева Е.Ю.* Автоматизированное распознавание дефектов сварных соединений при визуальном контроле с использованием геометрических признаков // Дефектоскопия. 2020. № 3. С. 49—57.
4. *Trieb K., Glinz J., Reiter M., Kastner J., Senck S.* Non-destructive testing of ceramic knee implants using micro-computed tomography // The Journal of Arthroplasty. 2019. V. 34. № 9. С. 2111—2117.
5. *Syryamkin V.I., Klestov S.A., Suntsov S.B.* Digital X-ray Tomography / 2nd edition. London: Red Square Scientific, Ltd., 2020. 200 p. ISBN 978-0-9928299-9-5.
6. *de Mendonça Filho F. F., Copuroglu O., Schlangen E., Šavija B.* Determination of loss of reinforcement due to corrosion through X-ray computer micro-tomography // Materials. 2021. V. 14. No. 4. P. 893.
7. *Сыряжкин В.И., Клестов С.А., Сунцов С.Б.* Патент № 2745304 С1 Российская Федерация, МПК G01N 23/04. Способ рентгеновской томографии и устройство для его осуществления. № 2020133674. Заявл. 14.10.2020. Опубл. 23.03.2021. Заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет».
8. *Бехтин Ю.С., Клестов С.А., Куцов М.С., Сыряжкин В.И., Титов Д.В.* Теоретические основы цифровой обработки изображений в встраиваемых системах технического зрения. Томск: STT, 2016. 406 с. ISBN 978-5-93629-577-5.
9. *Hanke R., Fuchs T., Uhlmann N.* X-ray based methods for non-destructive testing and material characterization // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2008. V. 591. No. 1. P. 14—18.
10. *De Samber B., Renders J., Elberfeld T., Maris Y., Sanctorum J., Six N., Liang Z., De Beenhouwer J., Sijbers J.* FlexCT: a flexible X-ray CT scanner with 10 degrees of freedom // Optics Express. 2021. V. 29. No. 3. P. 3438—3457.
11. *Сыряжкин В.И.* Цифровой рентгеновский 3D-микротомограф для диагностики материалов и элементов радиоэлектронной аппаратуры // Дефектоскопия. 2016. № 9. С. 29—38.
12. *Shaloo M., Schnall M., Klein T., Huber N., Reitingner B. A.* Review of Non-Destructive Testing (NDT) Techniques for Defect Detection: Application to Fusion Welding and Future Wire Arc Additive Manufacturing Processes // Materials. 2022. V. 15. No. 10. P. 3697.
13. *Marusina M. Ya., Kaznacheeva A. O.* Modern methods of tomography. Textbook. St. Petersburg: St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics Press, 2006. 132 p.
14. *Livieri P., Tovo R.* Actual weld profile fatigue performance by digital prototyping of defected and undefected joints // Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. 2022. V. 45. No. 11. P. 3436—3446.
15. *Foorginejad A., Azargoman M., Mollayi N., Taheri M.* Modeling of weld bead geometry using adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) in additive manufacturing // Journal of Applied and Computational Mechanics. 2020. V. 6. No. 1. P. 160—170.
16. *Bandi B., Dinda S. K., Kar J., Roy G. G., Srirangam P.* Effect of weld parameters on porosity formation in electron beam welded Zircaloy-4 joints: X-ray tomography study // Vacuum. 2018. V. 158. P. 172—179.
17. *Galos J., Ghaffari B., Hetrick E. T., Jones M. H., Benoit M. J., Wood T., Sanders P.G., Easton M. A., Mouritz A. P.* Novel non-destructive technique for detecting the weld fusion zone using a filler wire of high x-ray contrast // NDT & E International. 2021. V. 124. P. 102537.
18. *Han S. C., Park H. M., Uhm S. H., Choi D. Y., Jeong H. C., Kim Y. J., Jun T. S.* Evaluation of liquid metal embrittlement crack in resistance spot welds under intensive welding condition using industrial X-ray computed tomography and machine learning // Welding in the World. 2021. V. 65. No. 10. P. 1887—1897.
19. *Бвееупе А.С., Каонде Б.М.* Дефекты сварных соединений / Международный студенческий строительный форум-2017. 2017. С. 32—38.
20. *Стакян М.Г., Пирумян Н.В., Мартиросян А.В.* Классификация повреждений и воздействующих факторов для разработки оптимальных расчетных схем сварных швов газопроводов // Вестник Национального политехнического университета Армении. Механика, машиноведение, машиностроение. 2021. № 2. С. 52—62. DOI 10.53297/18293387-2021.2-52
21. *Шнеерсон В.Я.* Классификации периодических структур сварных швов, образованных при сварке металлов плавлением // Электронно-лучевая сварка и смежные технологии. 2020. С. 169—192.
22. *Назаров Р.М., Газатуллин З.М.* Обзор методов анализа дефектов сварных швов на рентгенографических изображениях / Юность и знания-гарантия успеха-2020. 2020. С. 223—227.
23. *Hesse A.C., Nitschke-Pagel T., Dilger K.* On the effect of weld defects on the fatigue strength of beam welded butt joints // Procedia Structural Integrity. 2018. V. 13. P. 2053—2058.
24. *Gosavi P.D., Sarkar K.K., Khunte S.K., Pawar V.R., Basu B.* Microstructure and mechanical properties correlation of weld joints of a high strength naval grade steel // Procedia Structural Integrity. 2019. V. 14. P. 304—313.
25. *Кархин В.А., Хомич П.Н., Иванов С.Ю.* Модели источников теплоты для прогнозирования тепловых полей при сварке плавлением // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2010. № 4-1. С. 241—254.
26. *Milyardi I., Baskoro A.S.* Effect of current and speed on porosity in autogenous Tungsten Inert Gas (TIG) welding of aluminum alloys A1100 butt joint // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. V. 348. No. 1. P. 012021.

27. Сливинский А.А., Препияло А.А., Бондаренко В.Л., Слюта В.П. Расчетно-экспериментальный анализ тепловых процессов сварки. 2014. № 1 (66). С. 76—83.
28. Matuszewski M. Modeling of 3D temperature field in butt welded joint of 6060 alloy sheets using the ANSYS program // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. V. 659. No. 1. P. 012034.
29. Capriccioli A., Frosi P. Multipurpose ANSYS FE procedure for welding processes simulation // Fusion engineering and Design. 2009. V. 84. No. 2-6. P. 546—553.
30. Samad Z., Nor N.M., Fauzi E.R.I. Thermo-Mechanical Simulation of Temperature Distribution and Prediction of Heat-Affected Zone Size in MIG Welding Process on Aluminium Alloy EN AW 6082-T6 // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. V. 530. No. 1. P. 012016.
31. Deng D., Murakawa H. Prediction of welding distortion and residual stress in a thin plate butt-welded joint // Computational Materials Science. 2008. V. 43. No. 2. P. 353—365.
32. Пантелеенко Ф.И., Шумов О.В. Повышение прочности сварных соединений при дуговой сварке // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. 2017. № 11. С. 34—37.
33. Bajpai T., Gupta P. K., Malik A. Thermomechanical Analysis of Pulsed Laser Welded Thin Aluminium Alloy Sheets // Optimization of Industrial Systems. 2022. P. 439—446.
34. Braun R., Donne C.D., Staniek G. Laser beam welding and friction stir welding of 6013-T6 aluminium alloy sheet // Materialwissenschaft und Werkstofftechnik: Materials Science and Engineering Technology. 2000. T. 31. № 12. С. 1017—1026.
35. Goyal A., Kapoor H., Jayahari L., Saxena K. Experimental investigation to analyze the mechanical and microstructure properties of 310 SS performed by TIG welding // Advances in Materials Science and Engineering. 2022. V. 2022.
36. Syryamkin V.I., Klestov S.A., Suntsov S.B. Desing of 3D X-ray Microtomograph Based on Its Digital Twin // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2022. V. 58. No. 11. P. 1041—1049. [Сырямкин В.И., Клестов С.А., Сунцов С.Б. Проектирование рентгеновского 3D-микротомографа на основе его «цифрового двойника» // Дефектоскопия. 2022. № 11. С. 56—65.]
37. Martinussen M. Numerical modelling and model reduction of heat flow in robotic welding. Norwegian University of Science and Technology-Department of Engineering Cybernetics. Trondheim. Norway 11.3. Electronic sources Volvo Group.
38. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015618555. Российская Федерация. САПР 3D PMT. Программное обеспечение системы автоматизированного проектирования рентгеновских 3D микротомографов: № 2015615595: заявл. 25.06.2015: опубл. 12.08.2015 / С. С. Баус, В. И. Сырямкин, С. А. Клестов; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет».

## ИК ТЕРМОГРАФИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ АПЕРИОДИЧЕСКИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СУЩНОСТЕЙ В АТМОСФЕРЕ (ТОМСКИЙ ФЕНОМЕН СПУСТЯ 17 ЛЕТ)

© 2023 г. В.П. Вавилов<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Национальный Исследовательский Томский политехнический университет, Россия  
634050 Томск, пр-т Ленина, 30  
E-mail: \*vavilov@tpu.ru

Поступила в редакцию 01.04.2023; после доработки 01.04.2023  
Принята к публикации 01.04.2023

Настоящее исследование продолжает работы 2006 г., направленные на анализ аperiodических энергетических явлений в атмосфере с помощью метода инфракрасной термографии. Экспериментально подтверждено существование в течение многих лет энергетических сущностей неясной природы в пространственных зонах, подвергавшихся длительному энергетическому воздействию. Впервые предложена пространственно-временная математическая модель энергетических сущностей, которая хорошо согласуется с полученными экспериментальными данными.

*Ключевые слова:* инфракрасная термография, аperiodическая энергетическая сущность, обработка изображений.

DOI: 10.31857/S0130308223040061, EDN: YTQNTC

Наш мир погружен в огромный океан энергии,  
мы летим в бесконечном пространстве  
с непостижимой скоростью. Все вокруг  
вращается, движется — все энергия.  
Никола Тесла

### ВВЕДЕНИЕ

В декабре 2022 г. NASA объявила о начале исследований в области так называемых Неидентифицированных Аномальных Феноменов (Unidentified Anomalous Phenomena — UAP) [1]. Это решение было вызвано тем, что количество наблюдавшихся феноменов в различных странах превысило то, которое можно было бы объяснить их возможной фейковой природой, большой психикой наблюдателей, естественной природой явлений, обусловленных действием редких факторов, связанных с оптическими и электрическими феноменами, и т.д. [2, 3].

В настоящее время человеческая цивилизация располагает ошеломляющим арсеналом методов и средств «чувствования» (sensing) природных явлений. Оптические средства являются основными, и инфракрасное видение (infrared imaging) является важнейшим после оптической техники видимого диапазона. В Томском политехническом университете (ТПУ) в 2006 г. были выполнены предварительные исследования короткоживущих энергетических сущностей, обнаруженных в бункерах университета, где много лет эксплуатировались высокоэнергетические источники излучения различной природы, в частности, бетатроны, являющиеся визитной карточкой ТПУ. Результаты этих исследований сводились к тому, что при наблюдении за пространством безлюдных бункеров в течение длительного времени (1,5 суток) с помощью тепловизора ИК-диапазона при записи до 700 тысяч ИК-термограмм удалось обнаружить аperiodические энергетические сгустки с температурой, выше температуры окружающей среды на 0,8 °С, которые характеризовались размером до 1,5 м и временем жизни 1/6 с [4].

### АППАРАТУРА И ЭКСПЕРИМЕНТ

Поскольку свидетельства сотрудников ТПУ о ряде необъяснимых явлений в одном из бункеров (вспышки, шорохи, запах серы) появлялись регулярно на протяжении ряда лет, было принято решение установить один из лучших мировых тепловизоров последних лет — FLIP SC 666 — в пустующем бункере на более продолжительный, чем в предыдущих исследованиях, период, а именно на 7 суток. Тепловизор был подключен к стационарному компьютеру и при уникальной частоте записи 100 Гц обеспечил запись до 6 666 000 изображений, что потребовало нарастить

оперативную память компьютера до 666,6 Гб (объем усеченного кадра составлял 100 Кб). Тепловизор, снабженный широкоугольным объективом, визировал значительную часть пространства бункеров с температурой среды на уровне 19—20 °С. Паспортная чувствительность тепловизора составляла 10 мК, однако для улучшения этой величины осуществляли пакетное усреднение термограмм по 10 кадров, что повысило температурную чувствительность в  $\sqrt{10}$  раз, т.е. до 3 мК. Записывали как полные термограммы, так и температурные профили во времени, усредненные в пределах маски 15×15 пикселей.

Профили температуры, полученные для трех короткоживущих зон А1, А2 и А3 с аномальными температурными сигналами 0,3—0,5 °С, показаны на рис. 1. Время жизни указанных зон составляло около 0,5 с. В отличие от результатов тепловизионной съемки 2006 г. обнаружены энергетические сущности, характеризующиеся не только повышенной (зоны А1 и А2), но и пониженной температурой (зона А3). Если следовать бытовой терминологии, то можно предполагать, что так называемые «привидения» являются холодными, однако это не объясняет слабую генерацию тепловой энергии в двух других зонах. Одно из объяснений состоит в том, что зоны А1 и А2 скорее относятся к так называемому полтергейсту, генерирующему избыточную энергию, а не к холодным сущностям с пониженной энтропией. Термограммы, иллюстрирующие форму и размеры обнаруженных сущностей, приведены на рис. 2 с интервалом времени между кадрами 0,1 с, где аномально холодная зона А3 отчетливо наблюдается между двумя теплыми зонами А1 и А2. Следует заметить, что по сравнению с данными 2006 г. обнаружено увеличение («размножение») количества сущностей.

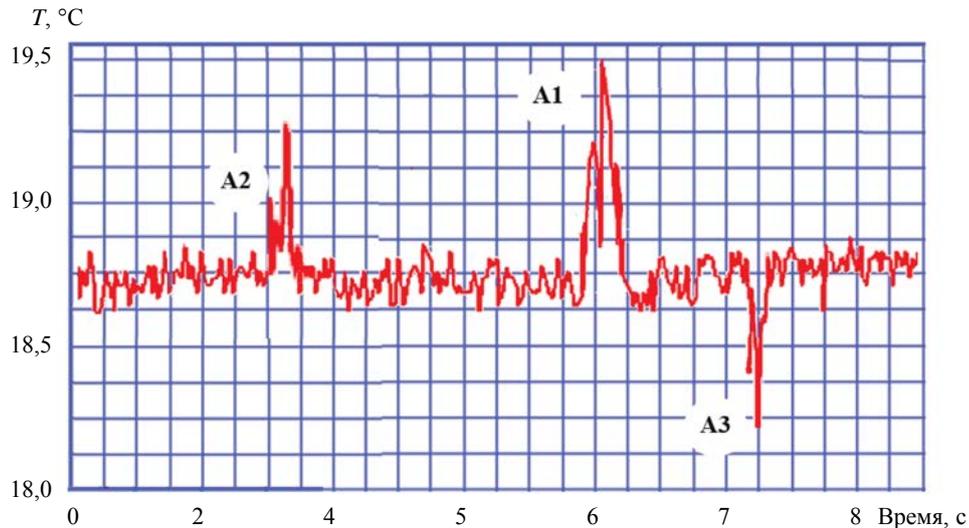


Рис. 1. Фрагмент профиля температуры во времени (А1, А2, А3 — аperiodические температурные сигналы, см. рис. 2).

Анализируя феноменологически пространственное распределение и поведение во времени обнаруженных аномальных зон, предложено описывать данный феномен распределением Гаусса:

$$F(\tau) = \frac{1}{2\pi\sigma(\tau)} e^{-\frac{(\tau-\tau_0)^2}{2\sigma(\tau)^2}} \text{ во времени,}$$

$$F(x,y) = \frac{1}{2\pi\sigma^{(x)}\sigma^{(y)}} e^{-\frac{1}{2} \left[ \frac{x^2}{2\sigma^{(x)^2} + \frac{y^2}{2\sigma^{(y)^2}} \right]} \text{ в декартовом пространстве.}$$

Здесь  $\tau$  — время;  $\tau_0$  — момент появления аномалии (в соответствующей системе отсчета);  $\sigma^{(\tau)}$  — стандартное отклонение процесса во времени;  $x, y$  — декартовы координаты с точкой отсчета в центре аномалии;  $\sigma^{(x)}, \sigma^{(y)}$  — стандартные отклонения процесса в пространстве.

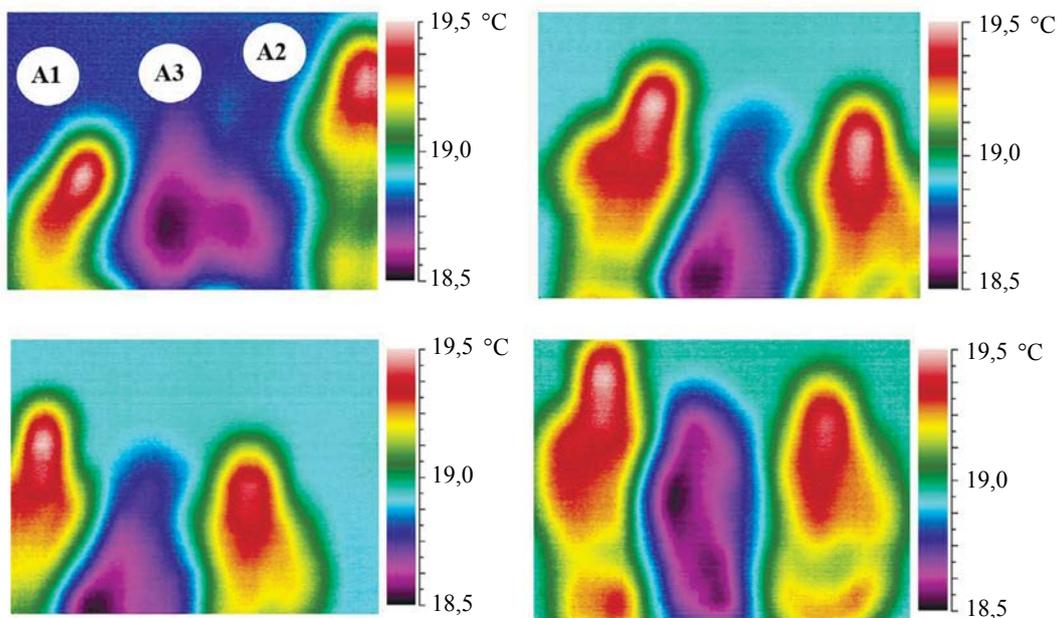


Рис. 2. Термограммы энергетических сущностей (сняты 1.04.2023 с интервалом 0,1 с).

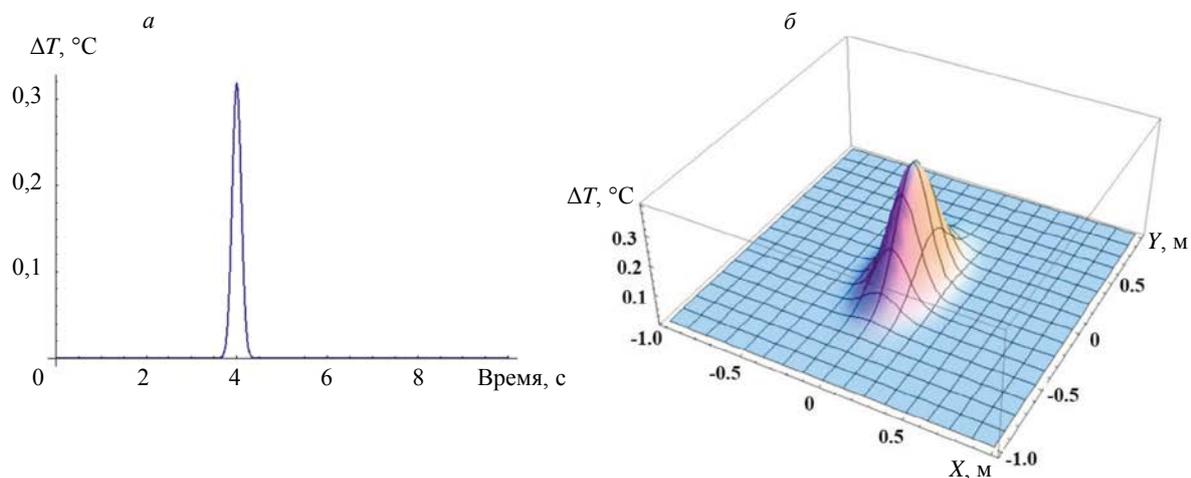


Рис. 3. Моделирование распределения энергетических сущностей в атмосфере: *a* — во времени ( $\sigma^{(t)} = 0,1$  с); *б* — в пространстве ( $\sigma^{(x)} = 0,1$  м,  $\sigma^{(y)} = 0,2$  м).

Примеры соответствующих распределений показаны на рис. 3 для следующих параметров, близким к реальным величинам:  $\sigma^{(t)} = 0,1$  с;  $\sigma^{(x)} = 0,1$  м;  $\sigma^{(y)} = 0,2$  м. Видно, что рис. 3 удовлетворительно описывает экспериментальные данные рис. 1 и 2.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Автор относит настоящее исследование к дефектоскопическим историям и не ставит цель признавать или отрицать наличие аномальных явлений в атмосфере. Этой работой подтверждено, что при наличии тепловизионной аппаратуры высокого качества, т.е. обладающей высоким пространственным и температурным разрешением, а также высокоскоростной записью ИК-термограмм,

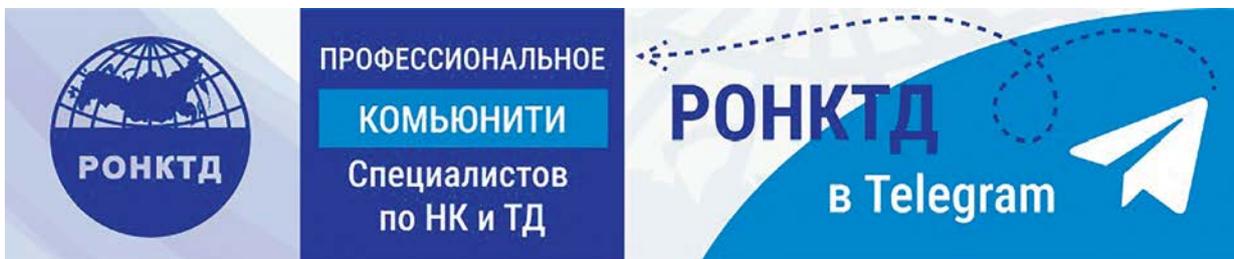
можно получать уникальную и зачастую необъяснимую информацию об окружающем мире. Фактически, экспериментально подтверждено существование в течение многих лет энергетических сущностей неясной природы в пространственных зонах, подвергавшихся длительному энергетическому воздействию. Впервые предложена пространственно-временная математическая модель энергетических сущностей, которая хорошо согласуется с полученными экспериментальными данными.

Данное исследование не выполнялось в рамках каких-либо грантов и контрактов и является сугубо инициативным. Автор выражает благодарность старейшему сотруднику лаборатории теплового контроля В.В. Ширяеву, участвовавшему в экспериментальных тепловизионных съемках 1 апреля 2006 и 2023 гг.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. <https://www.nasa.gov/feature/nasa-announces-unidentified-anomalous-phenomena-study-team-members>
2. *Карташкин А.С.* Полтергейст: пугающая реальность. Вече, 2019. 416 с.
3. *Devil D.* Abnormal phenomena in the atmosphere: World collection of unidentified cases. Hell Publisher, 2006. 666 с.
4. *Вавилов В.П.* Феноменологическое исследование пространственно-временной эволюции аperiodических энергетических сущностей методом инфракрасной термографии (Томский феномен) // Дефектоскопия. 2006. № 4. С. 96—98.

## ЗАПУСК ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО КОМЬЮНИТИ РОНКТД В TELEGRAM



Уважаемые коллеги!

1 марта 2023 года — день запуска профессионального комьюнити РОНКТД в Telegram и повод пригласить всех специалистов, чьи интересы тесно связаны с неразрушающим контролем и промышленной безопасностью, присоединиться к обществу единомышленников для общения, обмена опытом, обсуждения технологий и инноваций, производственных задач и поиска актуальных решений.

### ПОДПИСЫВАЙТЕСЬ НА НАШ КАНАЛ

Наша цель — собрать на одной медиаплощадке лидеров рынка НК и смежных отраслей: разработчиков технологий, производителей оборудования, сервисные компании и лаборатории НК с тем, чтобы оперативно информировать о ключевых событиях и мероприятиях в отрасли, новостях международных обществ по НК, обмениваться успешным опытом и развивать перспективные методы и средства неразрушающего контроля и диагностики для повышения качества промышленной продукции и безопасности промышленных объектов.

На этой площадке РОНКТД будет представлять актуальные новости, касающиеся проводимых им мероприятий, в том числе деловой программы Форума Территория NDT и Конференции по НК и ТД, этапах проведения отраслевых конкурсов и т.п. В этом году нас также ожидает много различных международных и национальных мероприятий. В Telegram мы расскажем о последних мировых достижениях в науке и технике и обсудим перспективы развития отрасли в России.

Коллеги, приглашаем вас присоединиться к созданию профессионального комьюнити специалистов по НК и ТД. Ваши компании, являясь лидерами отрасли, станут генераторами ключевых новостей. Новые разработки оборудования и технологии, реализованные проекты, мероприятия, которые вы проводите, представляют огромный интерес для российских и зарубежных специалистов по неразрушающему контролю.

Присылайте актуальную информацию о своих новинках и читайте новости наших партнеров, налаживайте партнерские связи. Наша совместная работа будет способствовать эффективному развитию потенциала отрасли НК в России.

**Управлять Телеграм-каналом от имени РОНКТД будет Юлия Зорина:**

*e-mail: [zorina@spektr.ru](mailto:zorina@spektr.ru)*



## ОТКРЫТИЕ РЕГИСТРАЦИИ НА XXIII ВСЕРОССИЙСКУЮ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКУЮ КОНФЕРЕНЦИЮ ПО НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ КОНТРОЛЮ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ



Уважаемые коллеги!

Российское общество по неразрушающему контролю и технической диагностике приглашает Вас принять участие в

### XXIII ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ ПО НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ КОНТРОЛЮ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ УМНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ НК. ЕДИНСТВО ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ

#### РЕГИСТРАЦИЯ НА КОНФЕРЕНЦИЮ

#### УСЛОВИЯ УЧАСТИЯ

Раз в три года Конференция становится профессиональной площадкой для обмена знаниями и опытом российских и зарубежных ученых и специалистов-практиков.

XXIII Всероссийская конференция посвящена «умным» технологиям НК в свете единства теории и практики. С докладами выступят приглашенные лекторы из национальных обществ по НК, ведущих отраслевых научно-исследовательских институтов, государственных корпораций и министерств, производители оборудования и технологий, которые расскажут о задачах, проблемах и достижениях, путях развития систем и методов НК, МС и ТД, затронут общие вопросы обеспечения безопасности.

#### Тематики конференции:

- Изменения и перспективы развития в области методов, технологий и методик НК
- Разработка и внедрение современных приборов и систем НК, МС и ТД для производств и сложных инфраструктурных объектов
- Передовое математическое, алгоритмическое и программно-техническое обеспечение моделирования, получения и обработки информации, представления данных НК, МС и ТД
- Научные исследования новых материалов и высоких технологий как область НК
- Междисциплинарные направления современного НК
- Медицина, жизнеобеспечение и среда обитания человека как сфера НК и МС
- Подготовка и способы оценки знаний, умений и навыков специалистов НК
- Стандартизация и метрологическое обеспечение средств, систем и методик НК, МС и ТД

Конференция проходит параллельно с X юбилейным международным Форумом «Территория NDT» — ключевым событием для специалистов и экспертов на территории СНГ. На выставке будут представлены перспективное оборудование и технологии применения средств НК, МС и ТД. В рамках деловой программы Форума будет проведен финальный этап конкурса

«Дефектоскопист 2023», Молодежная научно-техническая конференция, Салон инноваций, «Новая генерация», вручены Национальные премии в области НК и ТД и награждены победители конкурса выпускных квалификационных работ «Новая генерация» профильных кафедр ВУЗов.

**Ждем Вас 23-25 октября 2023 года в Москве, ЦВК Экспоцентр, павильон 2.4.**

